

УДК 624.130:622.02:550.83

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ГРУНТОВОГО МАССИВА ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ  
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ ЗАКРЕПЛЕНИИ**

**С. М. Простов<sup>1</sup>, Н. Ю. Никулин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,*

*E-mail: psm.kem@mail.ru,*

*ул. Весенняя, 26, 650000, г. Кемерово, Россия*

<sup>2</sup>*ООО “НООСТРОЙ”, ул. Ворошилова, 30, 650056, г. Кемерово, Россия*

Приведены результаты комплексных экспериментальных исследований на опытном полигоне закономерностей изменения физических свойств грунтового массива при электрохимическом закреплении. Применяемые методы мониторинга: инженерно-геологические изыскания с лабораторными испытаниями проб грунтов, статическое геомеханическое, сейсмическое, электрическое и георадиолокационное зондирование. Экспериментально подтверждено формирование в межэлектродном пространстве трех основных зон (упрочнения, осушения, промежуточной), установлены диапазоны пространственно-временных изменений влажности, модуля деформации, сцепления, угла внутреннего трения, скоростей упругих волн, удельного электросопротивления, интегральных параметров георадарограмм. Обоснованы пути повышения эффективности двух- и однорастворной схем электрохимического закрепления, областей применения геофизических методов мониторинга.

*Электрохимическое закрепление, физические свойства грунтов, электрическое зондирование, георадиолокация*

Наземные горнотехнические сооружения (копры, галереи, эстакады и др.), подземные объекты неглубокого заложения (тоннели, метро, хранилища, коллекторы, резервуары и др.) находятся в механическом взаимодействии с грунтовыми основаниями [1]. Песчано-глинистые грунты в рыхлом или влагонасыщенном состоянии резко снижают свои деформационные и прочностные параметры, поэтому при строительстве сооружений или ликвидации их аварийных состояний активно применяют методы уплотнения частично связанных грунтов цементными [2] и химическими [3, 4] растворами, что существенно улучшает их строительные свойства. Неотъемлемой частью горно-строительных работ является физико-технический контроль и мониторинг состояния и свойств грунтов в основаниях сооружений, включающий прямые методы (инженерно-геологические изыскания, маркшейдерские и геодезические измерения, полевое статическое зондирование) и геофизические измерения (сейсмические, ультразвуковые, электромагнитные, ядерно-физические, гравиметрические) [5].

Исследования выполнены при поддержке грантов ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” по проектам № П234 и № 14.В37.21.1581.

Инъекционные методы уплотнения грунтов скрепляющими растворами показали свою эффективность в твердых трещиноватых породах и пористых песчаных и гравелистых грунтах. Уникальность массива глинистых грунтов как основания технического сооружения состоит в сочетании низкой прочности и малой проницаемости. Для управления их свойствами недостаточно эффективны инъекционные методы, поскольку химические растворы и смолы не удается закачать в массив. Один из путей решения данной проблемы — электрохимическое закрепление (ЭХЗ), основанное на электроосмотическом насыщении грунтов при протекании электрического тока. ЭХЗ включает комплекс электродинамических, электрокинетических и физико-химических процессов, происходящих в массивах влагонасыщенных глинистых грунтов при пропускании электрического тока с одновременной подачей укрепляющего раствора и откачкой сдrenированной влаги. Теоретические, экспериментальные и технологические аспекты ЭХЗ грунтов развиты в работах [6–8].

Технология двухстадийного ЭХЗ, находящаяся в стадии освоения и включающая сначала насыщение массива вяжущим составом, а затем обработку отверждающим раствором, инициирующим гелеобразование, схватывание смеси и омоноличивание массива, не обеспечивает эффективного управления процессами гелеобразования, поэтому закрепление грунта происходит недостаточно равномерно, качество водоизоляции и уровень конечной прочности массива часто остаются низкими. Актуальным является развитие концепции одностадийного ЭХЗ, в частности на основе кремнефтористоводородной рецептуры. Кроме сокращения времени обработки, данная технология обеспечивает более высокое качество закрепления. Эффективное применение технологии ЭХЗ требует знания закономерностей формирования зон закрепления, осушения и изменения физико-механических свойств массива в этих зонах.

В КузГТУ проведены теоретические и лабораторные исследования, включающие компьютерное моделирование электрических и фильтрационных полей в зоне обработки, экспериментальное изучение образцов закрепляющих растворов и закрепленных грунтов, физическое лабораторное моделирование двухэлектродных установок ЭХЗ. Основные полученные результаты, изложенные в [9], заключаются в следующем:

— при обработке методом ЭХЗ в межэлектродном пространстве формируются зоны упрочнения, осушения и промежуточная, контуры и размеры которых зависят от технологических параметров (расположения электродов, их формы, напряжения и плотности тока, состава растворов, времени обработки и др.);

— в пределах указанных зон физико-механические свойства грунтов (гранулометрический состав, пористость, влажность, деформационные и прочностные показатели) изменяются во времени как в процессе обработки, так и после ее окончания, причем эти изменения взаимосвязаны с вариациями физических полей (акустических, электромагнитных), что обеспечивает высокую информативность геофизического мониторинга.

Одной из наиболее существенных проблем, сдерживающих активное применение ЭХЗ в строительной геотехнологии, является недостаточная изученность закономерностей пространственно-временных изменений физических свойств грунтового массива на различных стадиях электрообработки и набора прочности. При этом наиболее эффективными считаются методы исследований, основанные на измерении аномалий электрических и электромагнитных полей, сочетающие высокую производительность и информативность. Экспериментально-теоретические предпосылки этих методов заключаются в установленных взаимосвязях электрофизических свойств укрепляемых глинистых горных пород с их пористостью и влагонасыщенностью [10].

Практическая реализация электрометрического мониторинга возможна на основе схем классического малоглубинного электрического зондирования [11] или применения многоэлектродных установок (электротомографии) [12, 13]. Весьма перспективен метод высокочастотного электромагнитного сканирования (георадиолокации) – наиболее оперативный из известных методов геомониторинга. Теория и методика георадиолокационного контроля состояния и свойств приповерхностных зон грунтовых массивов развита в публикациях [14–17]. Работа георадара основана на приеме и компьютерной обработке электромагнитного сигнала, отраженного от границ сред в диапазоне частот  $f > 10$  МГц. Функциональные возможности программного комплекса георадиолокации позволяет построить радарограммы, структура и цветовая палитра которых отражает строение и электромагнитные свойства исследуемого массива. Опыт применения георадаров типа Лоза, Грот, ТР-ГЕО, ОКО для решения различных задач геотехнологии и геомеханики показал, что они обеспечивают в диапазоне частот  $f = 25 - 1700$  МГц глубину зондирования до 17–20 м, разрешающую способность до 3 см при диагностировании пустот и ослабленных зон [18, 19]. Вместе с тем не выявлены рациональные области применения георадиолокации в составе систем комплексного геомониторинга процессов уплотнения грунтов, методы интерпретации радарограмм в значительной степени субъективны, не обоснованы количественные критерии, обеспечивающие локацию аномальных зон в плоскости и в пространстве, контроль изменения свойств массива внутри этих зон.

КузГТУ совместно с ООО “НООЦЕНТР” на опытном полигоне проведены комплексные натурные экспериментальные исследования закономерностей изменения физических свойств грунтового массива при ЭХЗ, основные результаты которых приведены в данной работе.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

План и вертикальный разрез экспериментальной установки показан на рис. 1. Установка включает восемь электродов-инъекторов, представляющих собой перфорированные трубы диаметром 57 мм (диаметр отверстий, расположенных в шахматном порядке, 3 мм, глубина погружения 3 м). Испытывались две основные схемы ЭХЗ: двухрастворная с последовательной обработкой массива растворами “жидкого стекла” и хлористого кальция и однорастворная с однократной обработкой смесью “жидкого стекла” и гелеобразующего раствора кремнефтористоводородной кислоты при различном времени гелеобразования  $T$ . Основные параметры экспериментального ЭХЗ грунтов приведены в табл. 1.

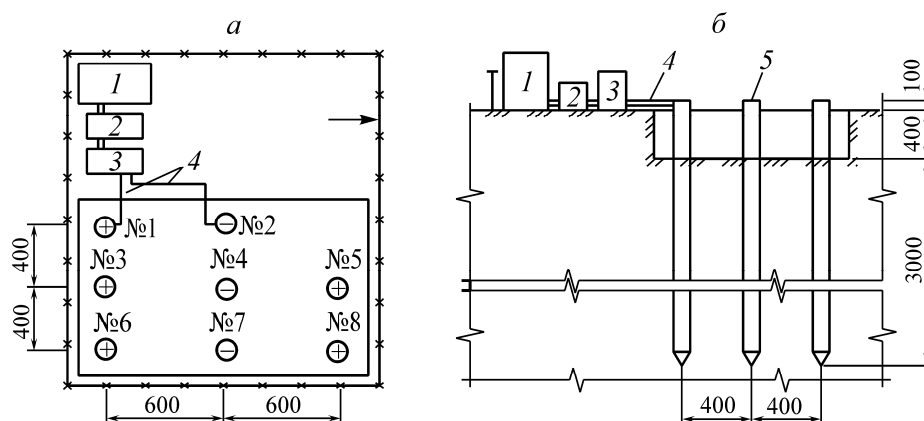


Рис. 1. План (а) и вертикальный разрез участка применения технологии экспериментального одностадийного ЭХЗ (б): 1 — трансформаторная подстанция; 2 — силовой понижающий трансформатор; 3 — регулируемый преобразователь-выпрямитель; 4 — электрический кабель; 5 — электроды-инъекторы; № 1–8 — номера электродов-инъекторов

ТАБЛИЦА 1. Параметры экспериментального ЭХЗ грунтов

| Плотность компонентов, г/см <sup>3</sup> |   |                          | Вид закрепления (время телеобразования $T$ , ч) | Плотность тока $j$ , А/м <sup>2</sup> | Максимальная сила тока $I$ , А | Объем инъецируемого раствора $V$ , м <sup>3</sup> | Время инъецирования $t$ , ч | Максимальное напряжение на электродах, В | Общее количество электродов | Объемное соотношение инъецируемого раствора |
|--|---|--------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------|---|-----------------------------|--|-----------------------------|---|
| жидкого стекла $g_c$                     | кремнефтористо-водородной кислоты $g_b$ | хлористого кальция $g_k$ |   |                                       |                                |   |                             |  |                             |   |
| 1.2                                      | —                                       | 1.08                     | Двухрастворное                                  | 9.74                                  | 30                             | 0.06 + 0.033                                      | 60 + 30                     | 150                                      | 6                           | —   |
| 1.06                                     | 1.037                                   | —                        | Однорастворное (45)                             | 16.67                                 | 30                             | 0.035   | 50                          | 120 – 160                                | 2                           | 1:9   |
| 1.06                                     | 1.03                                    | —                        | Однорастворное (60)                             | 8.33                                  | 15                             | 0.16  | 50                          | 70 – 110                                 | 6                           | 1:9   |

Для изучения пространственно-временных изменений физических свойств грунтового массива применялся комплекс методов: инженерно-геологические изыскания с лабораторным испытанием проб; сейсмическое, электрическое и георадиолокационное зондирование. Информация о применяемой измерительной аппаратуре и контролируемых параметрах приведена в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Измерительная аппаратура и контролируемые параметры при геомониторинге

| Вид мониторинга                                  | Измерительная аппаратура   | Контролируемые параметры  |
|--|--|---|
| Инженерно-геологические изыскания                | Комплект приборов для лабораторных исследований образцов           | Влажность $W$ ; сцепление $C$ ; угол внутреннего трения $\varphi$ ; консистенция $I_L$  |
| Полевое статическое геомеханическое зондирование | Аппаратура “ТЕСТ-К2”, зонд “Пика”                                  | Удельное сопротивление вдавлению зонда $q_c$ ; удельное сопротивление на муфте трения $f_s$ ; модуль полной деформации $E$ [20] |
| Сейсмическое зондирование                        | Сейсморазведочная станция “ЛАККОЛИТ Х-М2”, сейсмоприемники GS-20DX | Скорость продольной волны $V_p$ ; скорость поперечной волны $V_s$ ; несущая способность стандартной сваи $P$ [23]               |
| Электрическое зондирование                       | Автокомпенсатор “Березка”, аккумуляторная батарея АМЦГ-100         | Эффективное удельное электросопротивление $\rho_k$  |
| Радиолокационное зондирование                    | Георадар “ОКО-2”, антенный блок АБ-400                             | Средняя амплитуда отраженного сигнала $A$ ; интегральный показатель $I_A$   |

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

При двухрастворном ЭХЗ физико-механические свойства грунта определялись в следующие моменты времени: до начала эксперимента, через 7 и 14 сут после закрепления. Изменения основных физико-механических параметров образцов приведены на рис. 2.

В зоне упрочнения, прилегающей к электроду-инъектору с укрепляющим раствором, сцепление  $C$  грунта увеличилось, причем при использовании жидкого стекла при  $g_c = 1.2$  г/см<sup>3</sup> в диапазоне от 65 до 140 кПа, а при  $g_c = 1.05$  г/см<sup>3</sup> — от 65 до 100 кПа. В зоне электроосмотиче-

ского осушения по сравнению с первоначальным значением 65 кПа сцепление грунта выросло до 150 кПа, но через 14 сут после окончания обработки оно снизилось до 85 кПа. В средней зоне величина  $C$  занимает промежуточное положение, а через 14 сут она тоже снижается.

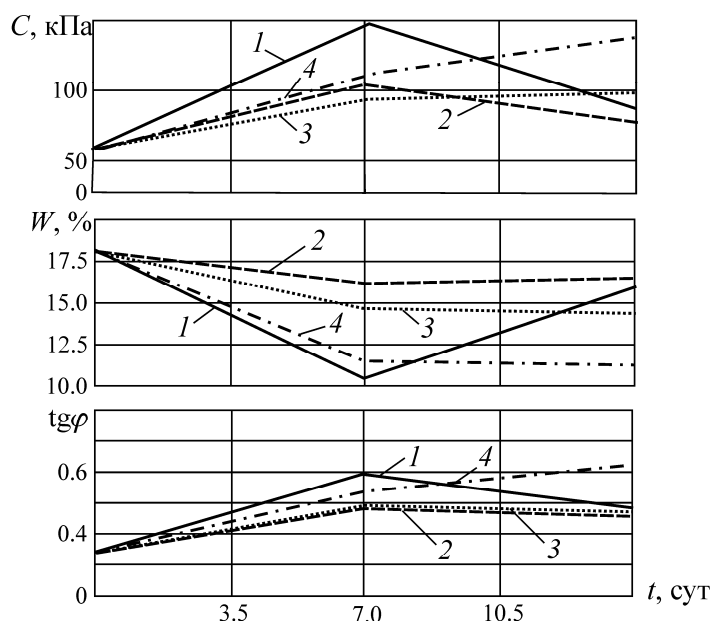


Рис. 2. Изменение сцепления грунта  $C$ , влажности  $W$  и коэффициента внутреннего трения  $f = \operatorname{tg} \varphi$  во времени  $t$  при двухрастворном закреплении: 1 — зона осушения; 2 — промежуточная зона; 3 — зона упрочнения при  $g_c = 1.05 \text{ г/см}^3$ ; 4 — зона упрочнения при  $g_c = 1.2 \text{ г/см}^3$

Естественная влажность грунта составляла  $W_0 = 18.23 \%$ , после проведения ЭХЗ состояние массива существенно изменилось. Во всех зонах через 7 сут после электрообработки наблюдалось снижение влажности  $W$ , причем наиболее интенсивно — в зоне электроосмотического осушения. Через 14 сут влажность у катода (в зоне электроосмоса) увеличилась за счет процессов вторичного увлажнения грунтовыми водами и атмосферной влагой. Значение коэффициента внутреннего трения  $f$  выросло по сравнению с первоначальным во всех закрепляемых зонах, причем в период  $t = 7 - 14$  сут оно стабилизировалось на уровне  $f = 0.46 - 0.64$ . Значительные диапазоны изменения конечных прочностных параметров закрепленных грунтов связаны с влиянием гранулометрического и минерального состава на макро- и микроскопические консолидационные свойства дисперсных грунтов (глин, суглинков, супесей) [21, 22].

При однорастворном закреплении использовались составы с различной плотностью кремнефтористоводородной кислоты (см. табл. 1):  $g_k = 1.037 \text{ г/см}^3$  (время гелеобразования  $T = 45 \text{ ч}$ ) — состав № 1;  $g_k = 1.030 \text{ г/см}^3$  ( $T = 60 \text{ ч}$ ) — состав № 2.

Анализ результатов, полученных по данным инженерно-геологических изысканий и статического зондирования, представленных на рис. 3, позволил сделать следующие выводы:

— в зоне однорастворного закреплении составом № 2 значения сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  в зоне ЭХЗ меньше, чем при использовании состава № 1, в 1.52 и 1.1 раза соответственно, что обусловлено в основном различием во времени гелеобразования; в промежуточной зоне и зоне электроосмотического осушения значения сдвиговых характеристик при использовании обоих составов увеличились по отношению к начальным значениям в диапазонах:  $\varphi$  — в 1.6–2 раза;  $C$  — в 4.8–6.3 раза; максимальное увеличение сцепления грунта  $C$  наблюдалось в зоне ЭХЗ при составе № 1 и превышало в 15.4 раза начальное;

— диапазоны модуля деформации глинистого массива  $E$ , полученные по результатам статического зондирования, имеют различия, характерные для трех основных зон ЭХЗ, при этом в ходе закрепления составом № 2 в зоне ЭХЗ произошло увеличение модуля деформации  $E$  по отношению к начальному в 2.86 раза, а при закреплении составом № 1 — в 3.9 раза; в промежуточной зоне получено увеличение  $E$  при закреплении составом № 1 в 1.86 раза, а при закреплении составом № 2 — в 1.78 раза;

— начальное значение консистенции  $I_L$  соответствует полутвердым грунтам; через 1020 ч от начала обработки при закреплении составом № 1 значение  $I_L$  уменьшилась в 4.08 раза, что соответствует переходу грунта в твердое состояние; на момент окончания эксперимента значение  $I_L$  при закреплении составом № 1 в 1.23 раза больше, чем при закреплении составом № 2.

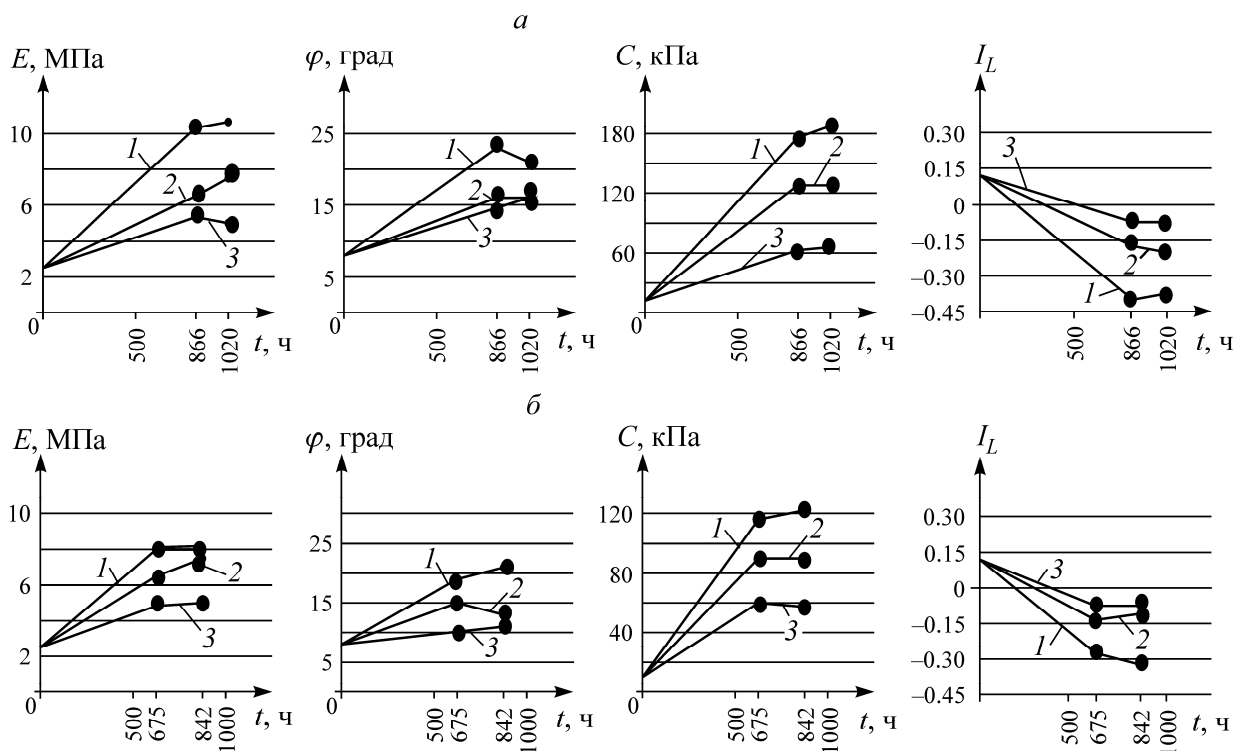


Рис. 3. Изменение модуля деформации  $E$ , угла внутреннего трения  $\varphi$ , сцепления  $C$  и консистенции  $I_L$  грунта во времени  $t$  в процессе однорастворного закрепления при интервале времени гелеобразования состава  $T = 45$  ч (а) и  $T = 60$  ч (б): 1 — зона упрочнения; 2 — зона осушения; 3 — промежуточная зона

Характерные результаты сейсмического и электрического зондирований представлены на рис. 4. При изучении акустических характеристик закрепленных грунтов оценивалось изменение скоростей прохождения продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  сейсмических волн через массив грунта в пределах зон осушения и укрепления, дополнительно определялись несущая способность сваи  $P$  по методике, изложенной в [23]. При закреплении составом № 1 ( $T = 45$  ч) через 722 ч после окончания обработки скорость  $V_s$  на этом участке увеличилась на 24 % и составила 145 м/с, скорость  $V_p$  возросла на 18 % (рис. 4а). В зоне электроосмотического осушения изменения скоростей  $V_p$  и  $V_s$  составили не более 2–5 %. Увеличение скоростей  $V_p$  и  $V_s$  волн наблюдалось в зоне упрочнения у инъекторов № 5 и № 8 на 16 и 27 % соответственно (рис. 4б). Наибо-

лее значительные изменения эффективного удельного электросопротивления (УЭС) при двух- и однорастворном закреплении происходили на глубине погружения иньекторов до отметки  $h = 2$  м ( $AB/2 \leq 8$  м).

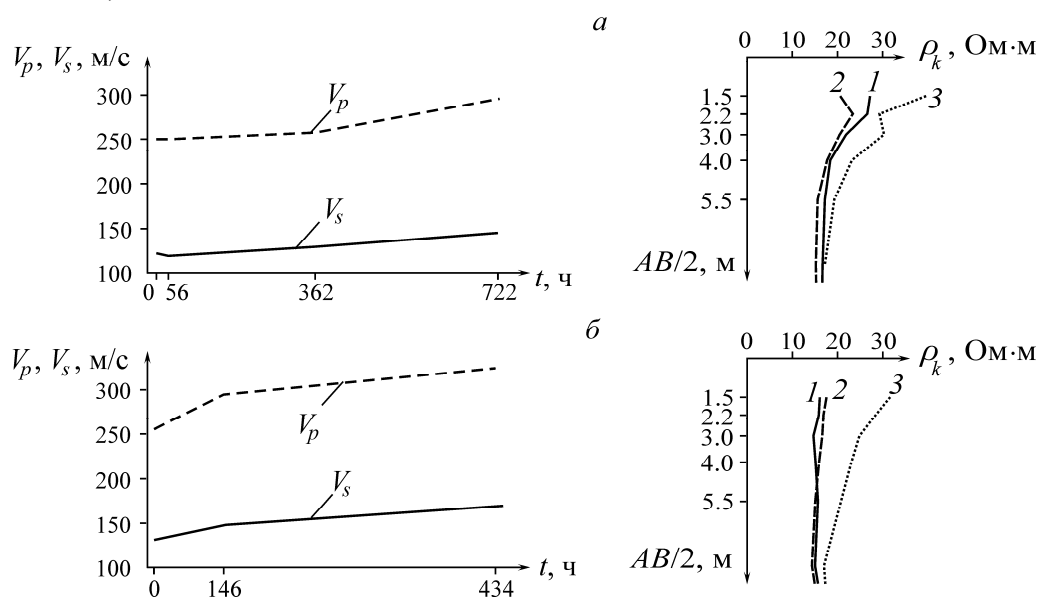


Рис. 4. Характерные графики изменения скоростей продольной  $V_p$ , поперечной  $V_s$  волн в зависимости от времени  $t$  и эффективного удельного электросопротивления  $\rho_k$  от базы зондирования  $AB$  в ходе однорастворного ЭХЗ при  $T = 45$  ч (а) и  $T = 60$  ч (б): 1 — до закрепления; 2 — через 4 сут после закрепления; 3 — через 20 сут после закрепления

При закреплении составом № 1 ( $T = 45$  ч, рис. 4а) через 4 сут после начала закрепления в зоне упрочнения наблюдалось снижение УЭС в 1.07–1.3 раза, а в зоне электроосмотического осушения в 1.16–1.25 раза. Через 20 сут после начала закрепления произошло увеличение УЭС относительно исходных значений в зоне упрочнения в 1.1–1.43 раза, а в зоне осушения — в 1.06–1.22 раза. Снижение УЭС в процессе ЭХЗ связано с интенсивным распространением активного раствора — электролита и увлажнением грунта в зоне электроосмоса, затем процессы связывания частиц грунта и вытеснения влаги вызвали увеличение УЭС.

При однорастворном закреплении № 2 ( $T = 60$  ч) наибольший прирост УЭС выявлен в зоне осушения. В приповерхностном слое массива ( $AB/2 < 4$  м) УЭС увеличилось в 1.81–4.3 раза (рис. 4б). В обеих зонах ЭХЗ через 4–6 сут наблюдалось снижение УЭС на 5–20 %, а затем через 20 сут — увеличение до первоначальных значений. Наиболее интенсивный рост УЭС в зоне упрочнения составил 20–28 % и зафиксирован в приповерхностной части зоны закрепления.

Геофизические методы сейсмического и электрического зондирования позволяют качественно контролировать стадии ЭХЗ и набор прочности укрепленной зоны, а с использованием установленных корреляционных зависимостей (табл. 3) — оценивать изменение прочностных параметров.

Георадиолокационное зондирование проведено по двум профилям (иньекторы № 3–5 и № 6–8 на рис. 1). Обработка радарограмм реализована при помощи специально разработанного программного обеспечения с шагом интегрирования  $dx = dz = 8$  и 16 см. Использование интегрированных радарограмм позволяет значительно расширить возможности георадиолокационного мониторинга для решения подобных задач. В частности, на обработанных радарограммах с шагом интегрирования в диапазоне 0.08–0.16 м более четко диагностируются вертикальные границы зоны обработки, что недоступно при электрическом и акустическом зондировании.

ТАБЛИЦА 3. Корреляционные зависимости между физическими параметрами укрепленного массива

| Уравнение регрессии                      | $r, R$      | $s$    | $t_n$ |
|--|-------------|--------|-------|
| 1а. $V_s = 110.960 + 3.6085 \rho_k$      | $r = 0.684$ | 6.496  | 1.876 |
| 1б. $V_s = 121.75 \exp(0.0204 \rho_k)$   | $R = 0.687$ | 6.474  | 1.891 |
| 2а. $V_p = 222.926 - 12.2396 \rho_k$     | $r = 0.696$ | 21.344 | 1.937 |
| 2б. $V_p = 270.228 \exp(0.02741 \rho_k)$ | $R = 0.698$ | 21.272 | 1.950 |
| 3а. $P = 120.652 + 7.9408 \rho_k$        | $r = 0.793$ | 9.72   | 4.109 |
| 3б. $P = 149.989 \exp(0.03125 \rho_k)$   | $R = 0.788$ | 9.825  | 4.043 |

Примечание.  $P$  — несущая способность сваи, кН;  $\rho_k$  — эффективное удельное электросопротивление, Ом·м;  $r$  — коэффициент корреляции;  $R$  — корреляционное отношение;  $s$  — среднее квадратичное отклонение;  $t_n$  — надежность оценки

В отличие от стандартных методик интерпретации радарограмм, дающих возможность оператору определять только расположение, размеры ослабленных и влагонасыщенных зон по линиям синфазности отраженного сигнала [24–26], для количественной оценки изменений свойств массива в пределах аномальных зон целесообразно при георадиолокации использовать как среднюю абсолютную величину  $\bar{A}$  амплитуды отраженного сигнала, так и интегральный параметр  $I_A$ , включающий площадь исследуемой зоны:

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i; \quad I_A = \left( \sum_{i=1}^N S_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^N A_i S_i,$$

где  $A_i, S_i$  — амплитуда сигнала и площадь  $i$ -го элемента в пределах аномальной зоны;  $N$  — число элементов.

Анализ изменения количественных параметров радарограмм (амплитуда отраженного сигнала  $\bar{A}$  и интегральный показатель  $I_A$ ) позволил установить закономерности и диапазоны их изменения во времени на различных стадиях ЭХЗ (рис. 5).

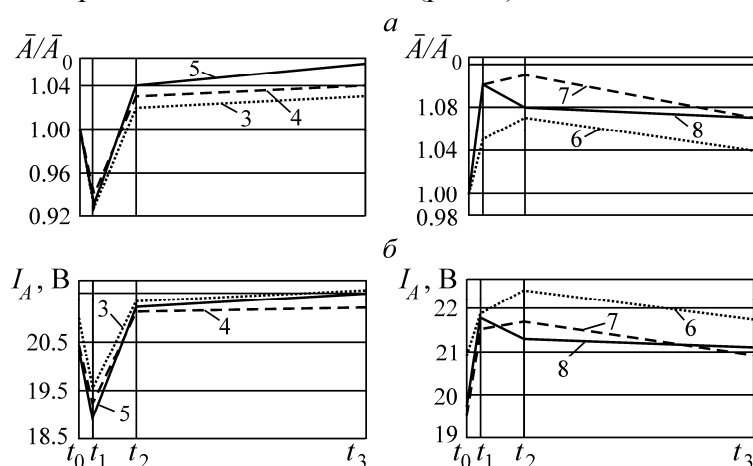


Рис. 5. Изменение интегральных параметров радарограмм  $\bar{A}/\bar{A}_0$  (а) и  $I_A$  (б) по электродам-инъекторам № 3–8 при шаге интегрирования  $dx = dz = 0.08$  м в различные моменты времени:  $t_0$  — до обработки;  $t_1$  — непосредственно после обработки;  $t_2$  — через 4 сут после ЭХЗ;  $t_3$  — через 20 сут после ЭХЗ



Установлено, что наибольшие диапазоны изменения контролируемых параметров  $\bar{A}$  и  $I_A$  зафиксированы у иньектора № 4. Динамика изменения параметров следующая: для профиля иньекторов № 3–5 наблюдается синхронное уменьшение во временном интервале  $t_0-t_1$  обоих параметров ( $\bar{A}$  — на 8–10 %,  $I_A$  — на 6–8 %), на интервале твердения и набора прочности  $t_1-t_3$  — монотонное увеличение обоих параметров соответственно на 10–14 и 9–14 %; для профиля иньекторов № 6–8 отрицательная аномалия на интервале  $t_0-t_1$  не зафиксирована, а на интервале  $t_1-t_3$  после резкого увеличения происходит снижение к моменту  $t_3$  обоих параметров на 4–6 %.

### ВЫВОДЫ

При всех видах ЭХЗ (двух- и однорастворном) в грунтовом массиве в межэлектродном пространстве наблюдается формирование трех основных зон, отличающихся по физико-механическим свойствам — упрочнения, осушения и промежуточной. Размеры этих зон зависят от технологических параметров (состава укрепляющей смеси, геометрии установки, времени электрообработки).

В результате ЭХЗ в межэлектродном пространстве происходит общее снижение влажности, увеличение модуля деформации, сцепления и угла внутреннего трения, причем в пределах зоны упрочнения эти изменения необратимы вследствие уплотнения грунта, в зоне осушения при обратном увлажнении исходные свойства грунтов могут восстанавливаться. Максимальное увеличение сцепления грунтов в результате ЭХЗ до 15 раз достигается через 20 сут после обработки.

Экспериментально подтверждено, что для повышения эффективности двухрастворной схемы ЭХЗ следует обеспечивать оптимальную плотность “жидкого стекла” в диапазоне  $g_c = 1.05 - 1.20$  г/см<sup>3</sup>. Для однорастворной схемы ЭХЗ целесообразно применять укрепляющую смесь с временем гелеобразования, близким к времени электрообработки.

Параметры физических полей (скорости упругих волн, удельное электросопротивление, амплитуда отраженного электромагнитного сигнала) взаимосвязаны с изменением физико-механических свойств грунтов в зоне ЭХЗ. Для оперативного мониторинга физических процессов необходимо применять: для интегрального мониторинга (по времени) — сейсмическое зондирование; для одномерного (по глубине) — электрическое зондирование; для двух- и трехмерного — георадиолокацию.

Авторы выражают благодарность генеральному директору ООО “НООЦЕНТР” к.т.н. О. В. Герасимову за техническое и материальное обеспечение экспериментальных исследований, к. г.-м.н. А. В. Плотникову за обработку результатов инженерно-геологических изысканий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокопов А. Ю., Страданченко С. Г., Шубин А. А. Горнотехнические здания и сооружения. — Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2006.
2. Ибрагимов М. Н., Семкин В. В. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов. — М.: АСВ, 2012.
3. Ржаницын Б. А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. — М.: Стройиздат, 1986.
4. Хямяляйнен В. А., Митраков В. И., Сыркин П. С. Физико-химическое укрепление пород при сооружении выработок. — М.: Недра, 1996.
5. Варганов, А. З. Физико-технический контроль и мониторинг при освоении подземного пространства городов. — М.: Горная книга, 2013.

6. Ломизе Г. М., Нетушил А. В. Электроосмотическое водопонижение. — М.: Госэнергоиздат, 1958.
7. Жинкин Г. Н., Колганов В. Ф. Электрохимическая обработка грунтов в основаниях сооружений. — М.: Стройиздат, 1980.
8. Страданченко С. Г., Должиков П. Н., Шубин А. А. Исследование параметров химического и электрохимического закрепления грунтов. — Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2009.
9. Простов С. М., Покатилов А. В., Рудковский Д. И. Электрохимическое закрепление грунтов. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2011.
10. Простов С. М., Хмяляйнен В. А., Бахаева С. П. Взаимосвязи электрофизических свойств глинистых горных пород с их пористостью и влагонасыщенностью // ФТПРПИ. — 2006. — № 4.
11. Татаркин А. В., Голубев К. В., Филимончиков А. А. Определение методами электротометрии характеристик фундаментов при реконструкции и строительстве зданий и сооружений // Основания, фундаменты, механика грунтов. — 2013. — № 5.
12. Рассказов И. Ю., Шкабарня Г. Н., Шкабарня Н. Г. Развитие метода электрической томографии при исследовании месторождений со сложными горно-геологическими условиями // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
13. Рассказов И. Ю., Шкабарня Г. Н., Шкабарня Н. Г. Исследование оползневых откосов угольных разрезов методом электрической томографии // ФТПРПИ. — 2013. — № 5.
14. Старовойтов А. В., Владов М. Л. Георадиолокационные исследования верхней части разреза. — М.: МГУ, 1999.
15. Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. — М.: МГУ, 2004.
16. Изюмов С. В., Дручинин С. В., Вознесенский А. С. Теория и методы георадиолокации. — М.: Горная книга, МГТУ, 2008.
17. Основы георадиолокации. — М.: НПЦ “Геотех”, 2006.
18. Старовойтов А. В., Пятилова А. М., Шалаева Н. В., Калашников А. Ю. Выделение пустот методом георадиолокации // Инж. изыскания. — 2013. — № 13.
19. Старовойтов А. В., Романова А. М., Калашников А. Ю. Возможности георадиолокации при изучении ослабленных зон в верхней части разреза // Инж. изыскания. — 2011. — № 4.
20. Рыжков И. Б., Исаев О. Н. Статическое зондирование грунтов. — М.: АСВ, 2010.
21. Тер-Мартirosян З. Г., Мирный А. Ю. Влияние неоднородности грунтов на их механические свойства // Основания, фундаменты, механика грунтов. — 2013. — № 6.
22. Ван Цзин, Хай-Хонг Мо, Шу-Чжо Лю. Анализ влияния минерального состава на макроскопические и микроскопические консолидационные свойства рыхлого дисперсного грунта // Основания, фундаменты, механика грунтов. — 2013. — № 6.
23. Бондарев В. И. Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей. — М., 1974.
24. Анур А., Старовойтов А. В., Владов М. Л. Опыт применения георадиолокации для выявления зон развития провалов в городе // Вестн. МГУ, сер. Геология. — М., 1999.
25. Набатов В. В., Гайсин Р. М., Гараньков И. И. Опыт георадиолокационного обследования массива для прогнозирования условий щитовой проходки коллекторов в условиях мегаполиса // ГИАБ. — 2011. — № 8.
26. Набатов В. В., Гайсин Р. М. Георадиолокационное обследование массивов горных пород вблизи эксплуатирующихся коллекторов с целью выявления областей разуплотнения // ГИАБ. — 2012. — № 8.

Поступила в редакцию 7/V 2015