

УДК 624.130:622.02:550.83

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

С. М. Простов¹, Н. Ю. Никулин²

¹*Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,*

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

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

²*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 одноразовой схем электрохимического закреплении, 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.

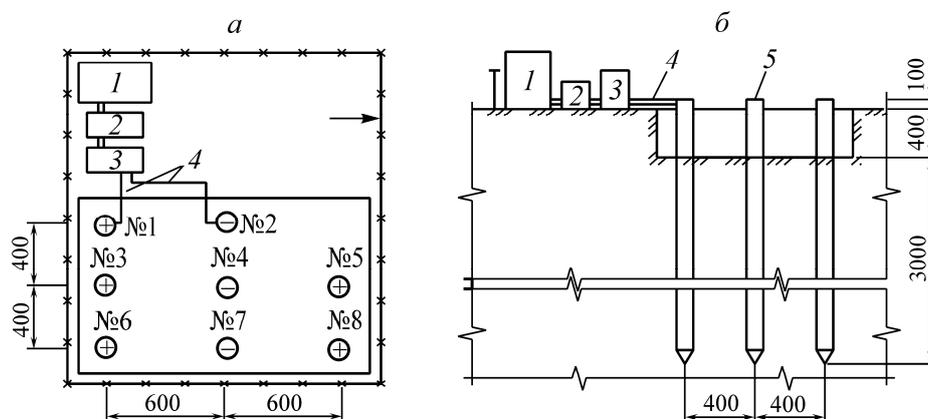


Рис. 1. План (а) и вертикальный разрез участка применения технологии экспериментального одностадийного ЭХЗ (б): 1 — трансформаторная подстанция; 2 — силовой понижающий трансформатор; 3 — регулируемый преобразователь-выпрямитель; 4 — электрический кабель; 5 — электроды-инъекторы; № 1–8 — номера электродов-инъекторов

ТАБЛИЦА 1. Параметры экспериментального ЭХЗ грунтов

Плотность компонентов, г/см ³			Вид закрепления (время телеобразования T , ч)	Плотность тока j , А/м ²	Максимальная сила тока I , А	Объем инъецируемого раствора V , м ³	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 φ ; 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 ρ_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/см³ в диапазоне от 65 до 140 кПа, а при $g_c = 1.05$ г/см³ — 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.

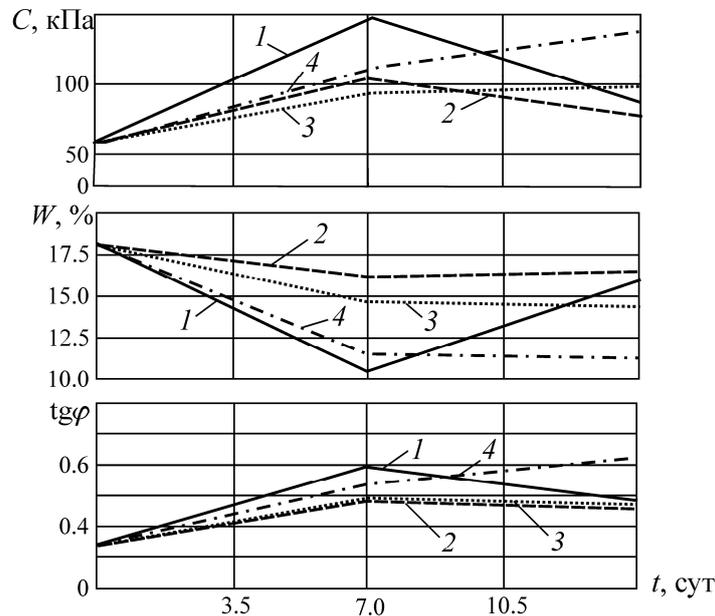


Рис. 2. Изменение сцепления грунта C , влажности W и коэффициента внутреннего трения $f = \operatorname{tg} \varphi$ во времени t при двухрастворном закреплении: 1 — зона осушения; 2 — промежуточная зона; 3 — зона упрочнения при $g_c = 1.05 \text{ г/см}^3$; 4 — зона упрочнения при $g_c = 1.2 \text{ г/см}^3$

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 φ 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: φ — 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.

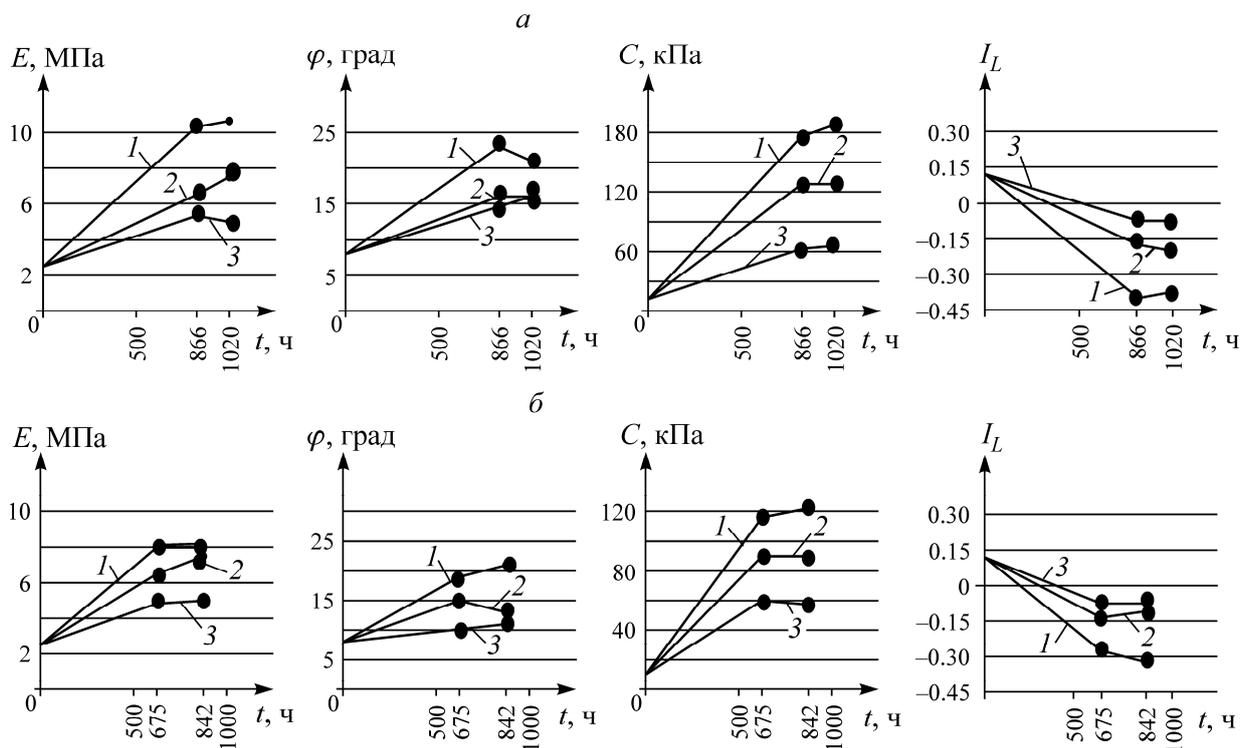


Рис. 3. Изменение модуля деформации E , угла внутреннего трения φ , сцепления C и консистенции I_L грунта во времени t в процессе однорастворного закрепления при интервале времени гелеобразования состава $T = 45$ ч (а) и $T = 60$ ч (б): 1 — зона упрочнения; 2 — зона осушения; 3 — промежуточная зона

Характерные результаты сейсмического и электрического зондирования 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).

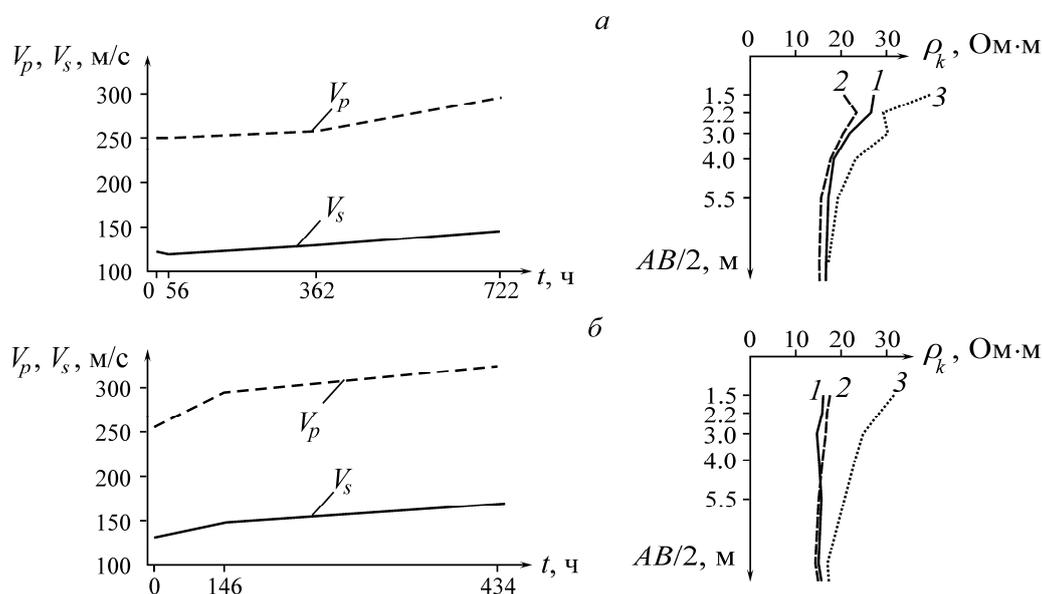


Рис. 4. Характерные графики изменения скоростей продольной V_p , поперечной V_s волн в зависимости от времени t и эффективного удельного электросопротивления ρ_k от базы зондирования AB в ходе однорастворного ЭХЗ при $T = 45$ ч (а) и $T = 60$ ч (б): 1 — до закрепления; 2 — через 4 сут после закрепления;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

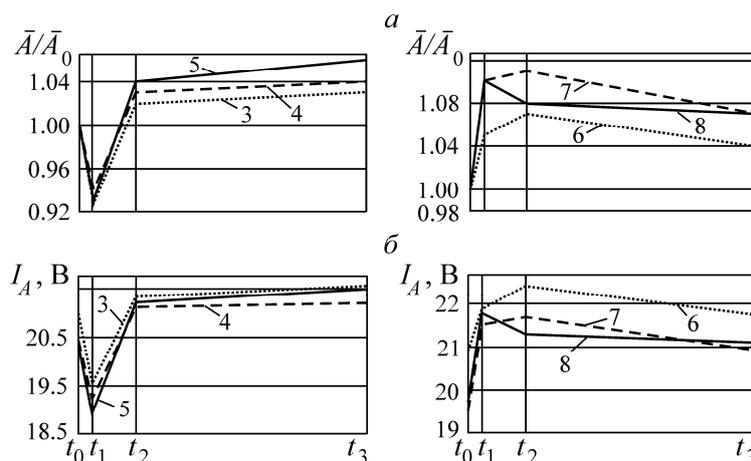


Рис. 5. Изменение интегральных параметров радарограмм \bar{A}/\bar{A}_0 (а) и I_A (б) по электродам-инъекторам № 3–8 при шаге интегрирования $dx = dz = 0.08$ м в различные моменты времени: t_0 — до обработки; t_1 — непосредственно после обработки; t_2 — через 4 сут после ЭХЗ; t_3 — через 20 сут после 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/см³. 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-Мартиросян 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