

УДК 624.130:624.131.4

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

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОДНОРАСТВОРНОЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ЗАКРЕПЛЕНИЕ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Уникальность глинистых грунтов как объекта воздействия состоит в сочетании низкой прочности и низкой проницаемости. Для управления их свойствами неэффективными являются инъекционные методы, поскольку цементные, химические растворы и смолы не удается закачать в грунтовой массив [1]<sup>1</sup>.

Технология двухстадийного электрохимического закрепления (ЭХЗ), находящаяся в настоящее время в стадии освоения, 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 весьма неравномерно, качество водоизоляции и уровень

на основе кремнефтористоводородной рецептуры. Кроме сокращения времени обработки данная технология обеспечивает принципиально более высокое качество закрепления. Вместе с тем, эта технология требует знания закономерностей формирования зон закрепления, осушения и изменения физико-механических свойств массива в этих зонах.

Для экспериментальных исследований технологии однорастворного ЭХЗ был подготовлен участок глинистого массива. План участка представлен на рис. 1.

На некотором удалении от места закрепления грунта были установлены электросиловая установка (силовой трансформатор ТС-40, выпрямительный преобразователь), емкости для хранения

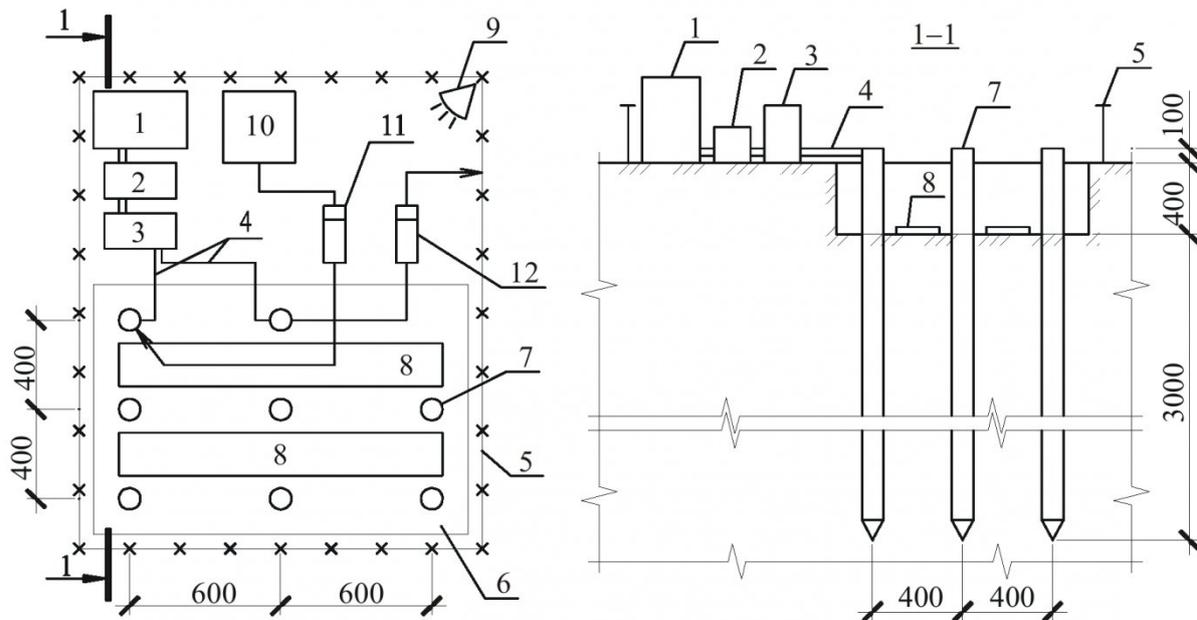


Рис.1. План участка применения технологии однорастворного ЭХЗ:

1 – трансформаторная подстанция; 2 – силовой трансформатор; 3 – преобразователь выпрямительный; 4 – электрический кабель; 5 – ограждение; 6 – участок массива, очищенный от верхнего слоя грунта; 7 – электроды-инъекторы; 8 – подмости;

9 – осветительный столб; 10 – емкость для раствора-электролита; 11 – насос для подачи закрепляющего раствора; 12 – насос для откачки катодной воды

конечной прочности массива часто остаются недостаточными [2,3]. Актуальным является развитие концепции одностадийного ЭХЗ, в частности,

разведенных до необходимой плотности жидкого стекла (плотность  $\rho_c = 1,06 \text{ г/см}^3$ ) и кремнефтористоводородной кислоты ( $\rho_k = 1,037 \text{ г/см}^3$  и  $\rho_k = 1,03 \text{ г/см}^3$ ), насосы для подачи электролитов и откачки катодной воды.

Для уточнения технологических параметров ЭХЗ и более качественного проведения производственного эксперимента перед основным было

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

проведено пробное закрепление при помощи двух электродов, идентичных основным по форме и размерам.

Схемы подключения электродов-инъекторов при пробном и основном закреплении приведены на рис. 2. В целях соблюдения техники безопасности вокруг участка было выполнено ограждение, а для обеспечения ведения работ в темное время суток установлено временное освещение.

В качестве электродов использовались перфо-

ными в первом и во втором случае 60 см.

Для закрепления грунта применялся однорастворный метод ЭХЗ. Продолжительность обработки грунта током составляла 50 ч. На протяжении всего этого периода в положительные электроды заливался электролит, полученный при смешивании в пробном закреплении жидкого стекла с плотностью  $\rho_k = 1,06 \text{ г/см}^3$  и кремнефтористоводородной кислоты с  $\rho_k = 1,037 \text{ г/см}^3$ , а при основном закреплении – жидкого стекла с плотно-

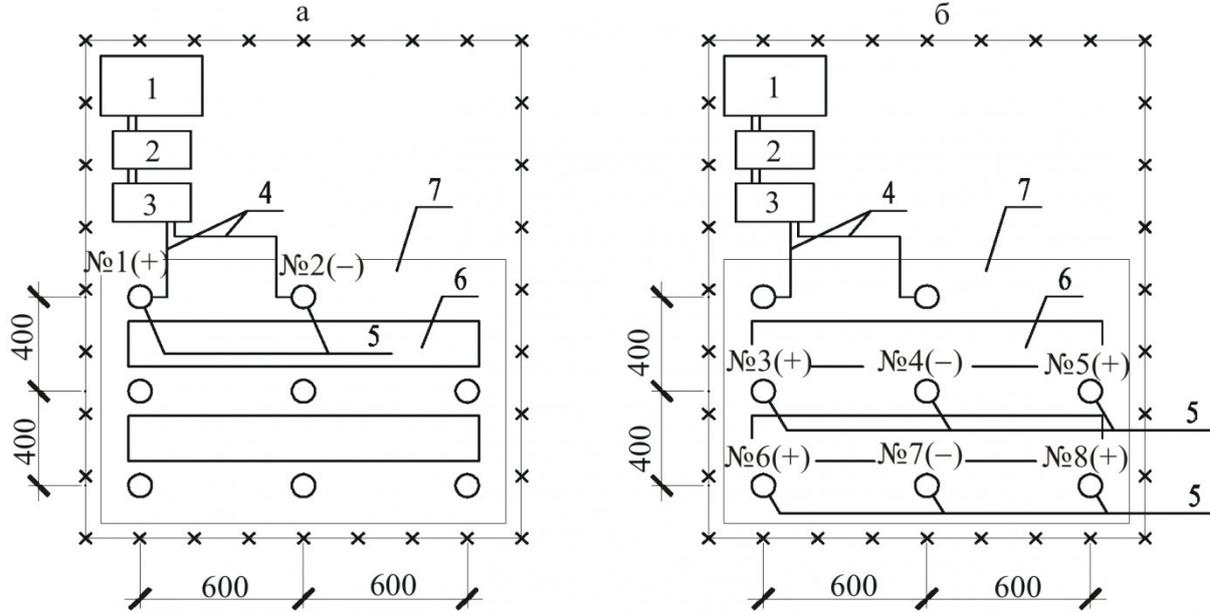


Рис. 2. Схема расположения и подключения электродов-инъекторов при пробном (а) и основном закреплении (б): 1 – трансформаторная подстанция; 2 – силовой трансформатор; 3 – преобразователь выпрямительный; 4 – электрический кабель; 5 – электроды-инъекторы; 6 – подмости; 7 – закрепляемый грунт

рированные трубы диаметром 57 мм. Перфорация на трубах выполнена в шахматном порядке. Глубина их погружения составляла 3 м. Диаметр отверстий 3 мм. При пробном закреплении применялась порядная схема подключения электродов, при этом полярность имела вид «анод – катод – анод». Расстояние между рядами электродов при основном закреплении 40 см, а между разноимен-

ными  $\rho_c = 1,06 \text{ г/см}^3$  и кремнефтористоводородной кислоты с  $\rho_k = 1,03 \text{ г/см}^3$ . В обоих случаях компоненты смешивались в объемном соотношении 1:9.

Откачка катодной воды производилась в течение всего процесса ЭХЗ. В ходе процесса закрепления поддерживалась постоянная плотность тока, в первом случае она составила  $j = 16,67 \text{ А/м}^2$ , а во втором случае  $j = 8,33 \text{ А/м}^2$  (табл. 1).

Таблица 1. Параметры экспериментального однорастворного ЭХЗ

Плотность компонентов		Вид закрепления	Плотность тока $j$ , А/м <sup>2</sup>	Поддерживаемая сила тока $I$ , А	Объем инъецируемого раствора $V$ , м <sup>3</sup>	Время инъецирования $t$ , ч	Напряжение на электродах $U$ , В	Общее количество электродов $N$	Объемное соотношение инъецируемого раствора
жидкого стекла $\rho_c$ , г/см <sup>3</sup>	Кремнефтористоводородной кислоты $\rho_k$ , г/см <sup>3</sup>								
1,06	1,037	Пробное	16,67	30	0,035	50	120–160	2	1:9
1,06	1,03	Основное	8,33	15	0,16	50	70–110	6	1:9

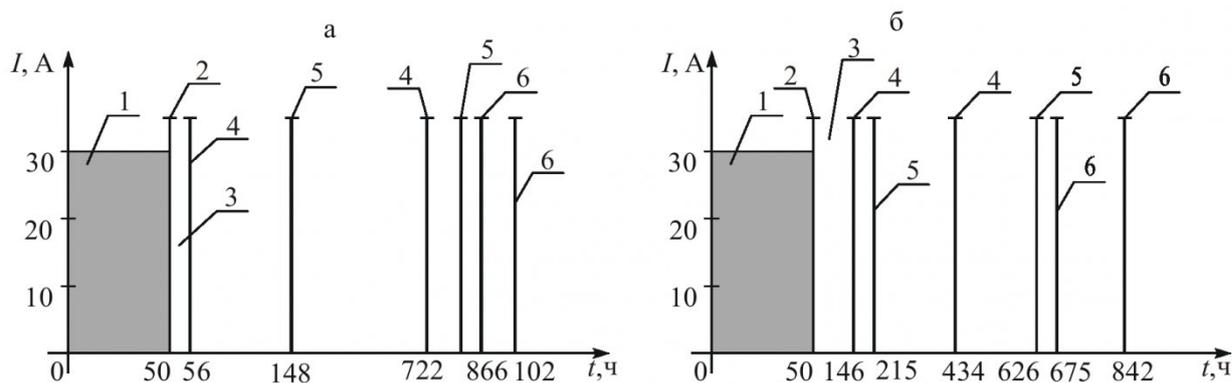


Рис.3. Планограмма проведения пробных (а) и основных (б) экспериментальных работ по ЭХЗ:

1 – обработка грунта постоянным электрическим током; 2 – окончание периода обработки; 3 – отсутствие обработки грунта током; 4 – проведение вертикального электрического зондирования, сейсморазведочных работ, неразрушающего электрометрического мониторинга; 5 – статическое зондирование; 6 – отбор проб для физико-механических испытаний

До начала закрепления глинистого массива был проведен комплекс исследований по определению основных физических и инженерно-геологических свойств грунта. После включения постоянного электрического тока контролировалось только изменение количества отфильтрованной воды, инъецируемого раствора и подаваемого напряжения. Наибольшее количество измерений было проведено после окончания обработки (рис. 3).

Контроль изменения физических свойств грунта включал три основных вида исследований: лабораторные работы; полевые инженерно-геологические изыскания, включающие статическое зондирование; геофизический мониторинг.

Основным оборудованием для полевых исследований являлся комплект аппаратуры для статического зондирования грунтов ТЕСТ-К2, который предназначен для зондирования мерзлых глинистых грунтов.

Все измерения выполнялись по ГОСТ 19912-2001 «Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием».

Основные параметры зондов, используемых в аппаратуре ТЕСТ-К2 следующие:

- диапазон измерения удельного сопротивления грунта по конусу  $q$ , МПа 0,12–30
- диапазон измерения удельного сопротивления грунта по муфте трения  $f$ , кПа 2–600
- основная погрешность измерения удельного сопротивления грунта не более 5%

Вдавливание зондирующей штанги производилось буровой установкой.

Места проведения статического зондирования, как при пробном, так и при основном закреплении были выбраны в зонах с максимальным влиянием электрохимического закрепления: электрообработки (ЭХЗ) – вблизи положительно заряженных электродов (анодов) и электроосмоса – вблизи отрицательно заряженных электродов (ка-

тодов). Расстояние от места статического зондирования до электродов составляло 8 см (рис. 4).

При проведении испытаний грунтов статическим зондированием вдавливание зонда осуществлялось плавно с постоянной скоростью и замером сопротивления грунта внедрению зонда. По измеренному сопротивлению грунта под острием и по боковой поверхности вдавливаемого в грунт зонда были получены характеристики свойств глинистых грунтов: модуль деформации  $E$ , угол внутреннего трения  $\phi$ , сцепление  $C$ .

На основании полученных данных были построены графики изменения основных прочностных свойств во времени (рис. 5).

Анализ графиков показал следующее:

- максимальное увеличение модуля деформации  $E$  наблюдалось в зоне ЭХЗ, при этом по сравнению со значением, полученным до начала закрепления, конечное (через 818 ч после начала ЭХЗ) увеличилось в 3,5 раза;
- конечные значения модуля деформации  $E$  в зонах электроосмоса как при основном, так и пробном закреплении имеют незначительное увеличение в 1,1 раза;
- величина модуля деформации в зоне ЭХЗ при пробном закреплении больше, чем при основном закреплении в 1,4 раза. Это связано с тем, что во время проведения основного закрепления использовался раствор с плотностью кремнефтористоводородной кислоты  $\rho_k = 1,03 \text{ г/см}^3$ , а при пробном  $\rho_k = 1,037 \text{ г/см}^3$  при том же объемном соотношении составляющих раствор компонентов;
- в зоне электроосмоса в ходе основного закрепления значение модуля деформации через 818 ч уменьшилось по сравнению со значением, полученным через 148 ч, до начального и составило 2,8 МПа, данное уменьшение произошло вследствие увлажнения прикатодной зоны;
- изменения показателей угла внутреннего

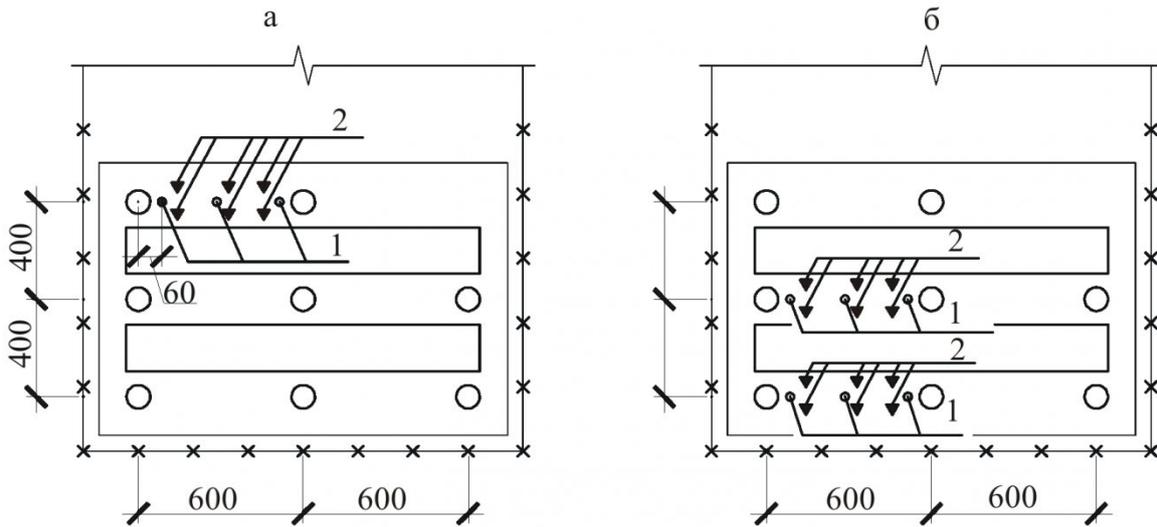


Рис. 4. Места отбора проб и статического зондирования при пробном (а) и основном закреплении (б):  
 1 – места отбора проб для определения физико-механических свойств грунта;  
 2 – места статического зондирования

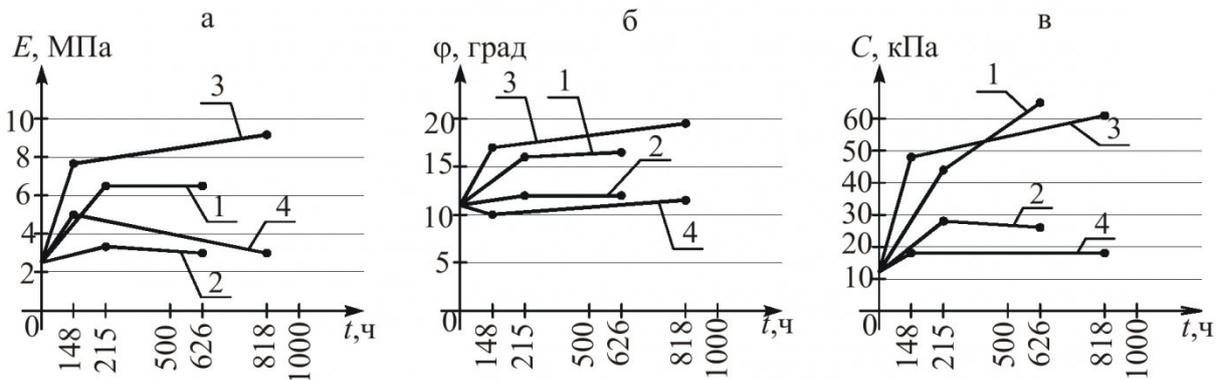


Рис. 5. Изменение модуля деформации (а), угла внутреннего трения (б) и сцепления (в) при основном и пробном закреплении, полученные по результатам статического зондирования:  
 1 – зона ЭХЗ основного закреплении; 2 – зона электроосмоса; 3 – зона ЭХЗ пробного закреплении; 4 – зона электроосмоса пробного закреплении

трения  $\phi$  и сцепления грунта  $C$  повторяют закономерности изменений значения модуля деформации  $E$ :

– при пробном закреплении значение угла внутреннего трения  $\phi$  в зоне ЭХЗ через 148 ч после начала ЭХЗ увеличилось в 1,42 раза, а через 818 ч – в 1,65 раза по сравнению с начальным, определенным до ЭХЗ; при основном закреплении увеличение составило 1,33 раза через 215 ч, а через 626 ч – 1,38 раза.

Более значительное увеличение  $\phi$  при пробном закреплении, вызвано более высокой плотностью кислоты, а следовательно более коротким временем гелеобразования раствора и более плотным гелем. Также при пробном закреплении после окончания обработки грунта током и инъектирования раствора в зоне ЭХЗ наблюдался более интенсивный набор прочности с течением времени.

Полученные результаты доказывают, что для получения грунта с высоким прочностными ха-

рактеристиками при применении технологии ЭХЗ необходимо использовать раствор со временем гелеобразования, меньшим, чем время обработки грунта током.

Параллельно со статическим зондированием для определения основных физических, деформационных, прочностных и фильтрационных свойств грунтов производился отбор проб и испытание их в лаборатории ООО «НООЦЕНТР-Д». Оборудование, использовавшееся при испытаниях, сертифицировано и поверено, а применяемые методики определения свойств соответствуют действующим нормам и правилам.

При испытании грунтов на одноплоскостной сдвиг использовался прибор ПСГ-3М и тарировочное приспособление к нему. Количество проб для получения значений сдвиговых характеристик в одной точке  $n = 5$ . Пробы отбирались с расстояния 5 см от электрода и в промежуточной зоне на одинаковом расстоянии от инъекторов (рис. 4).

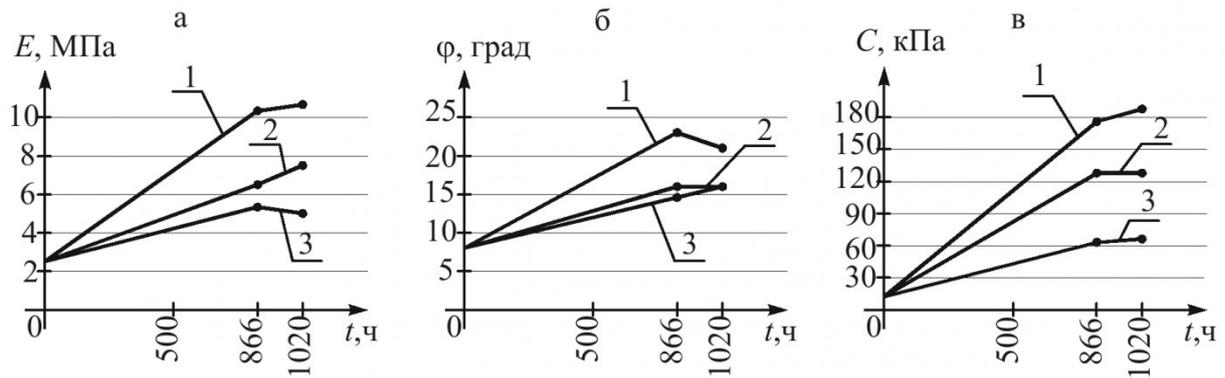


Рис. 6. Изменение модуля деформации  $E$  (а), угла внутреннего трения  $\phi$  (б) и сцепления  $C$  (в) грунта в ходе пробного закрепления:  
1 – в зоне ЭХЗ; 2 – в зоне электроосмоса; 3 – в промежуточной зоне

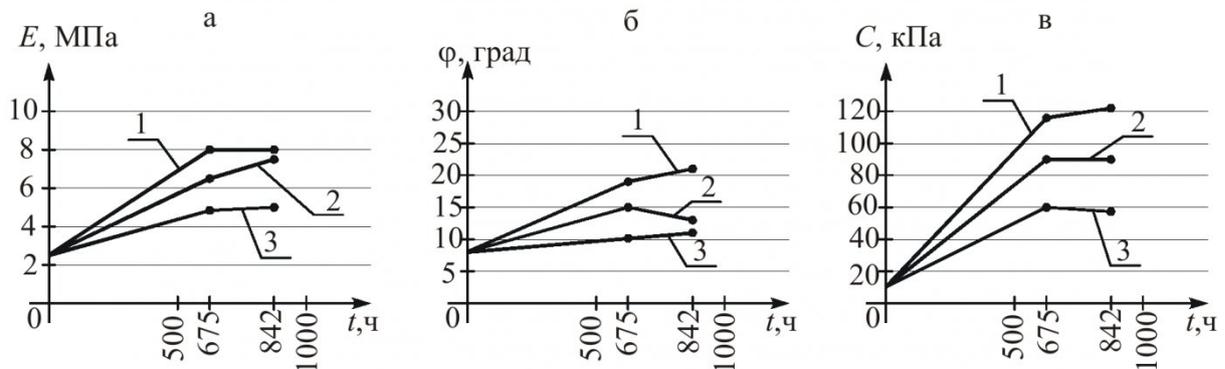


Рис. 7. Изменение модуля деформации  $E$  (а), угла внутреннего трения  $\phi$  (б) и сцепления  $C$  (в) грунта в ходе основного закрепления:  
1 – в зоне ЭХЗ; 2 – в зоне электроосмоса; 3 – в промежуточной зоне

Полученные графики изменения сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\phi$  в ходе основного и пробного закрепления (рис. 6 и 7) свидетельствуют о следующем:

- в зоне основного закрепления величина сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\phi$  в зоне ЭХЗ меньше, чем при пробном закреплении в 1,52 и 1,1 раза соответственно, что обусловлено, в основном, различием во времени гелеобразования (60 ч при основном по сравнению с 45 ч – при пробном);

- в промежуточной зоне и зоне электроосмотического осушения величины сдвиговых характеристик при основном и пробном закреплении увеличились по отношению к начальному в диапазонах:  $\phi$  – в 1,6–2 раза;  $C$  – в 4,8–6,3 раза;

- максимальное увеличение сцепления грунта  $C$  наблюдалось в зоне ЭХЗ при пробном закреплении и составило 15,42 раза по отношению к начальному;

- модуль деформации глинистого массива  $E$ , полученный по результатам лабораторных работ, для основного и пробного закрепления, имеет раз-

личия, характерные для трех основных зон ЭХЗ, при этом в ходе основного закрепления в зоне ЭХЗ увеличение модуля деформации  $E$  по отношению к начальному составило 2,86 раза, а при пробном – 3,9 раза;

- в промежуточной зоне произошло увеличение модуля деформации  $E$  при пробном закреплении 1,86 раза, а при основном – 1,78, данное незначительное увеличение связано с тем, что в эту зону проникло недостаточно укрепляющего раствора, поэтому процессы коагуляции глинистых частиц протекали менее интенсивно;

- в зоне электроосмоса отмечено монотонное увеличение модуля деформации  $E$  с течением времени во всех случаях испытания проб в лаборатории, что связано с постепенным насыщением этой зоны поровой жидкостью и положительным зарядом поровой жидкостью и положительным зарядом поровой жидкостью и положительным зарядом поровой жидкостью.

Очень важной дополнительной характеристикой физического состояния глинистых грунтов является консистенция  $I_L$ , которая определяет их физическое состояние при определенной влажности.

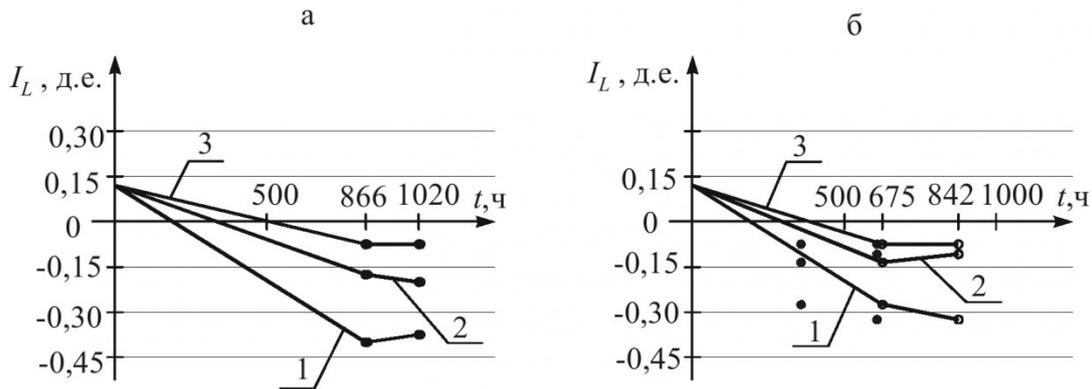


Рис.8. Изменение показателя консистенции грунта  $I_L$  в ходе пробного (а) и основного (б) закрепления при отборе проб с расстояния 5 см от анода и катода и по центру между электродами с глубины 1,2–1,4 м:  
1 – в зоне ЭХЗ; 2 – в зоне электроосмоса; 3 – в промежуточной зоне

После проведения основного и пробного закрепления глинистого массива были построены два графика изменения консистенции  $I_L$  (рис. 8) из которых выявлены следующие закономерности:

- начальное значение консистенции  $I_L$  свидетельствует о том, что закрепляемый грунт относится к полутвердым;
- консистенция грунта через 1020 ч от начала обработки при пробном закреплении уменьшилась в 4,08 раза по отношению к начальному значению, таким образом разновидность грунтов приняла вид – твердые;
- на момент последнего определения величина консистенции  $I_L$  при пробном закреплении больше, чем при основном закреплении, в 1,23

раза.

Анализируя комплекс полученных результатов изменений физических, деформационных, прочностных свойств грунтов можно сделать следующие основные выводы.

1. Наибольшее увеличение прочностных и деформационных параметров грунтов наблюдается в зоне ЭХЗ.
2. Для увеличения несущей способности грунтов следует применять закрепляющий раствор с временем гелеобразования, меньшим времени электрообработки.
3. Основным путем повышения интенсивности процессов ЭХЗ является увеличение рабочего напряжения установки  $U$  и плотности тока обработки  $j$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Простов, С. М. Комплексный мониторинг процессов высоконапорной инъекции грунтов / С. М. Простов, В. А. Хмяляйнен, О. В. Герасимов // РАЕН. – Кемерово; М. : Издательское объединение "Российские университеты" : Кузбассвуиздат. – АСТШ, 2006. – 94 с.
2. Жинкин, Г. Н. Электрохимическая обработка грунтов в основаниях сооружений / Г. Н. Жинкин, В. Ф. Калганов. М. : Стройиздат, 1980. -164 с.
3. Простов, С. М. Исследование параметров грунтов при электроосмотическом и электрохимическом укреплении на экспериментальной модели / С. М. Простов, М. В. Гуцал, А. В. Покатилов // Вестник РАЕН (ЗСО). 2004.- №6. С. 128-134.

□ Авторы статьи:

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

Никulin  
Николай Юрьевич,  
соискатель КузГТУ, инженер-геофизик ООО  
"НООЦЕНТР-Д".  
Тел. 83842-69-15-91  
e – mail n.y.[nikulini@mail.ru](mailto:nikulini@mail.ru)

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

Покатилов  
Андрей Владимирович,  
канд.техн.наук, доцент  
каф. строительного производства  
и экспертизы недвижимости  
ГУ КузГТУ,  
Тел. (3842) 39-63-36,  
e – mail  
[an.pokatilov@yandex.ru](mailto:an.pokatilov@yandex.ru)