

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 622.33: 624.131.32

А. В. Покатилов, С. М. Простов

КОНТРОЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАССИВА ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ ЗАКРЕПЛЕНИИ

Одной из основных причин недостаточной распространенности технологии электрохимического закрепления (ЭХЗ) неустойчивых грунтов в Кузбассе является неизученность гидродинамических и геомеханических процессов в зоне обработки массива¹. Это препятствует эффективному применению укрепительных работ, зачастую

значительной мере обусловлена отсутствием информативных и оперативных методик контроля указанных выше процессов.

Традиционными методами геоконтроля при ЭХЗ являются инженерно-геологические изыскания, связанные с выбуриванием или отбором проб и их испытаниями на лабораторных установках, а также полевые

те проведенных исследований разработана методика комплексного контроля процессов ЭХЗ, включающая наряду с механическим опробованием массива акустический и геоэлектрический контроль.

Для производственных исследований технологии ЭХЗ был подготовлен экспериментальный участок глинистого

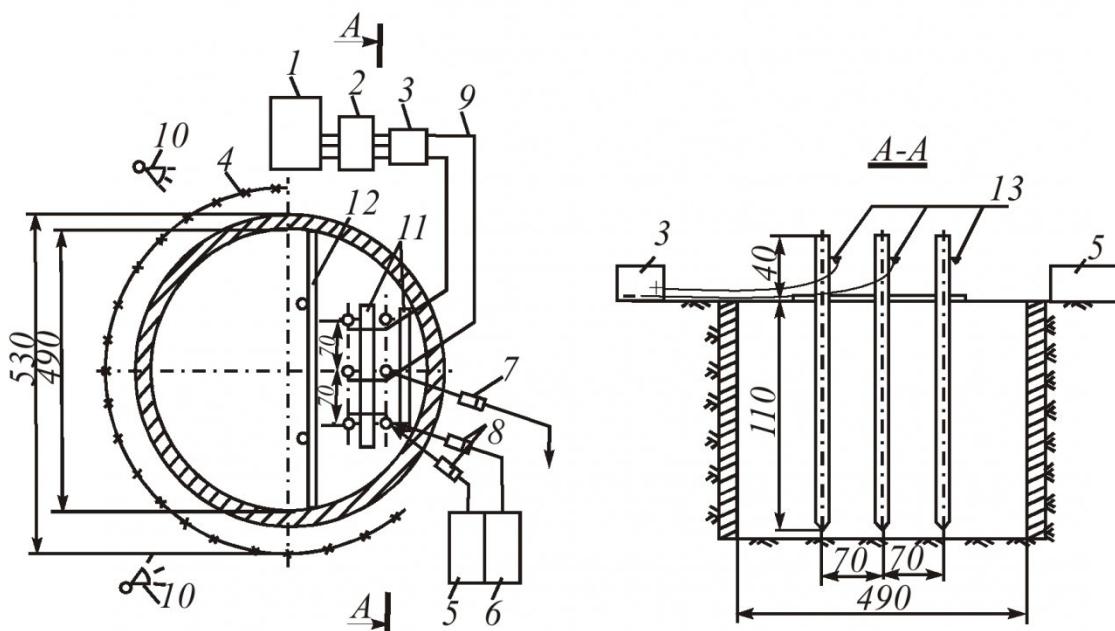


Рис. 1. Схема расположения электросиловой установки ЭХЗ:

1 – трансформаторная подстанция; 2 – трансформатор силовой; 3 – преобразователь выпрямительный; 4 – ограждение; 5 – емкость для жидкого стекла; 6 – емкость для хлористого кальция; 7 – насос для откачки катодной воды; 8 – насосы для подачи раствора-электролита; 9 – электрический кабель; 10 – осветительные фонари; 11 – подмости; 12 – опалубка; 13 – электроды-инъекторы

приводит к перерасходу энергии, материалов и трудозатрат. Данная негативная ситуация в

(шахтные) испытания массива с помощью устройств статического вдавливания. Поскольку указанные прямые методы трудоемки, дают только точечные результаты, их необходимо дополнять более интегральными и оперативными геофизическими экспресс-методами. В результа-

massiva. План опытного участка, схема подключения электродов-инъекторов и электросиловой установки представлены на рис. 1.

Вблизи места, предназначенного для закрепления, были установлены электросиловая установка (силовой трансфор-

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ по проекту №05-05-64100

матор ТС-40, выпрямительный преобразователь), емкости для хранения разведенного до необходимой плотности жидкого стекла, хлористого кальция, насосы для подачи электролитов и откачки катодной воды.

Постоянный ток от установки к электродам-инъекторам подавался по кабелям КГХЛ 2×35. Так как обработка массива проводилась непрерывно, то в целях безопасности вокруг закрепляемого участка было поставлено ограждение и осветительные фонари. В качестве электродов использовались трубы диаметром 50 мм. Глубина их погружения составляла 1,1 м. Для электрохимического закрепления применялась порядная схема подключения электродов, при этом полярность имела вид "анод-катод-анод". Расстояние между рядами электродов 60 см, а между разноименными по полярности электродами – 70 см.

В ходе выполнения эксперимента применялся двухрастворный метод ЭХЗ. В начальный период обработки продолжительностью 60 ч в электроды подавался водный раствор жидкого стекла, при этом в одну пару положительных электродов заливалось жидкое стекло с плотностью $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$, а во вторую – с плотностью $\gamma = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$. Во второй период продолжительностью 30 ч подавался водный раствор хлористого кальция ($\gamma = 1,08 \text{ г}/\text{см}^3$). Общая продолжительность процесса обработки составила 90 ч. Откачка катодной воды производилась в течение всего процесса ЭХЗ. В эксперименте была принята плотность тока, равная $j = 9,74 \text{ A}/\text{м}^2$. Достигнуть такой плотности тока позволило повышение напряжения до 150 В.

До начала эксперимента были проведены испытания закрепляемого массива, которые включали определение физико-механических свойств грунта, установление исходных значений электросопротивления грунта и времени прохождения ультразвуковой волны через массив.

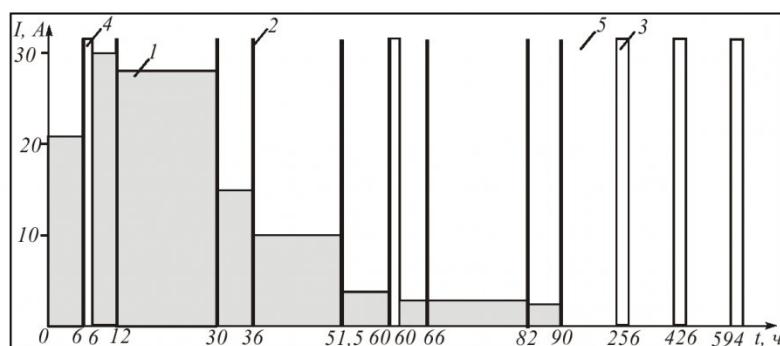


Рис. 2. Планограмма проведения экспериментальных работ во времени:

1 – электрохимическая обработка; 2 – контроль за силой тока, напряжением жидкого стекла, уровнем хлористого кальция, количеством откаченной воды, электросопротивлением грунта, временем прохождения ультразвуковой волны; 3 – отбор проб, измерение электросопротивления, времени прохождения ультразвуковой волны; 4 – период времени, когда обработка массива постоянным током не осуществлялась; 5 – электрохимическая обработка завершена

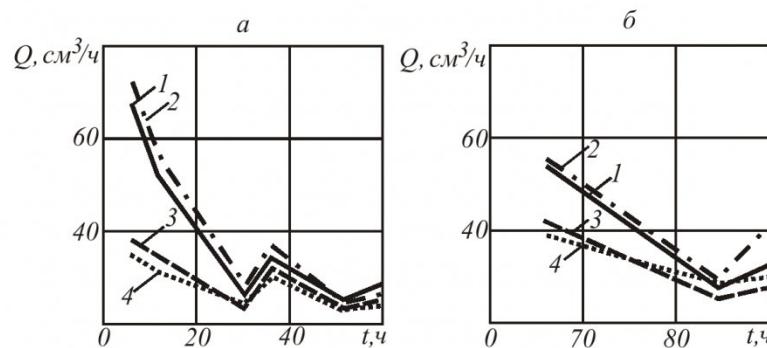


Рис. 3. Изменение расхода жидкого стекла (а) и хлористого кальция (б) во времени t при электрохимической обработке: 1 – электрод №1 ($\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$); 2 – электрод №5 ($\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$); 3 – электрод №2 ($\gamma = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$); 4 – электрод №6 ($\gamma = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$)

После начала электрообработки замеры всех основных характеристик укрепляемого массива производились два раза в сутки. При этом осуществлялось отключение электросиловой установки. По окончании обработки грунтов в наиболее характерных местах (в анодной, катодной и средней зонах) производился отбор проб и осуществлялись испытания грунта на сдвиг, определялись физико-механические и водные свойства. Отбор проб производился с интервалом 7 дней. Все виды измерений, которые были реализованы во время эксперимента, представлены на планограмме (рис. 2).

В течение всего периода об-

работки грунта постоянным током осуществлялся контроль за изменением расхода жидкого стекла и хлористого кальция. Графики изменения расхода Q химических растворов во времени t приведены на рис. 3.

Из графиков следует, что наиболее интенсивное распространение жидкого стекла наблюдалось в начальный период обработки массива в течение 12 ч. Там, где использовалось жидкое стекло плотностью $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$ (рис. 3, а, 1–2), распространение раствора значительно интенсивней, чем при плотности $\gamma = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$ (рис. 3, а, 3–4). За первые 12 ч обработки расход жидкого стекла плотностью $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$ через

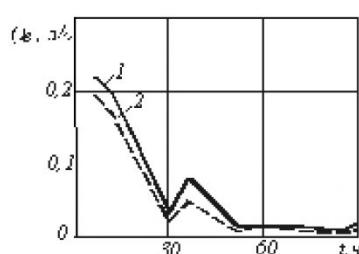


Рис. 4. Изменение количества отфильтрованной воды за период электрохимической обработки: 1 – электрод №3; 2 – электрод №4

электроды-инъекторы №№ 1 и 5 составил соответственно 71 см³/ч и 64 см³/ч, а при плотности $\gamma = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$ через электроды №№ 2, 4, 6–30 см³/ч и 23 см³/ч. Практически тот же эффект наблюдался при использовании хлористого кальция плотностью $\gamma = 1,08 \text{ г}/\text{см}^3$. В течение 30 ч после подачи в электроды-инъекторы хлористого кальция расход монотонно снижался и через 30 ч в среднем составил 20 см³/ч. Таким образом, радиус закрепления будет выше при использовании жидкого стекла плотностью $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$.

Во время ЭХЗ на отрицательных электродах-инъекторах происходило скопление воды. В ходе проведения эксперимента этот фактор также контролировался (рис. 4). Из графиков следует, что на интервале обработки от 0 до 60 ч наблюдалось монотонное снижение количества отфильтрованной воды с 0,22 л/ч до 0,01 л/ч.

С целью изучения технических характеристик электросилиевой установки в режиме регулирования напряжения через определенное количество часов обработки менялось подаваемое напряжение U , вследствие чего происходило изменение силы тока I (рис. 5). Изменение напряжения U не превышало 5 %, что обеспечивало точное регулирование режима обработки.

По изменению силы тока I весь период закрепления можно разделить на 3 основных временных этапа:

– увеличение I на начальном этапе, связанное с насыщением раствором при анодных областях;

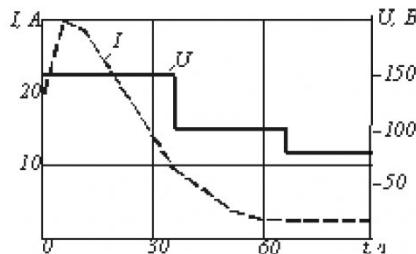


Рис. 5. Изменение силы тока I и напряжения U за время t электрообработки

тей ($t = 0 \dots 6 \text{ ч}$);

– монотонное снижение I на основном этапе обработки, определяемое в основном формированием в прикатодных областях зон электроосмотического осушения ($t = 6 \dots 60 \text{ ч}$);

– установление постоянного значения I на заключительном этапе, характеризующемся стабилизацией гидродинамических процессов в зоне обработки ($t = 60 \dots 90 \text{ ч}$).

Пробы для определения физико-механических свойств массива отбирались до начала эксперимента, через 7 и 14 сут после его окончания. Графики изменения физико-

механических параметров образцов (сцепления C , влажности W и коэффициента внутреннего трения f), определенных с помощью приборов полевой лаборатории ПЛЛ-9, приведены на рис. 6.

В зоне электрохимической обработки сцепление C грунта увеличилось там, где использовалось жидкое стекло при $\gamma = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$ от 0,65 МПа до 1,4 МПа, а при $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$ – от 0,65 до 1 МПа. В зоне электроосмотического осушения по сравнению с первоначальным значением 0,65 МПа сцепление грунта выросло до 1,5 МПа, но через 14 сут после окончания эксперимента оно снизилось до 0,85 МПа. В средней зоне величина C занимает промежуточное положение, а через 14 сут тоже снижается (рис. 6, а).

Еще одним важным физико-механическим свойством состояния связных грунтов является влажность W . До начала эксперимента влажность грунта составляла $W_0 = 18,23 \%$, но после его проведения состояние

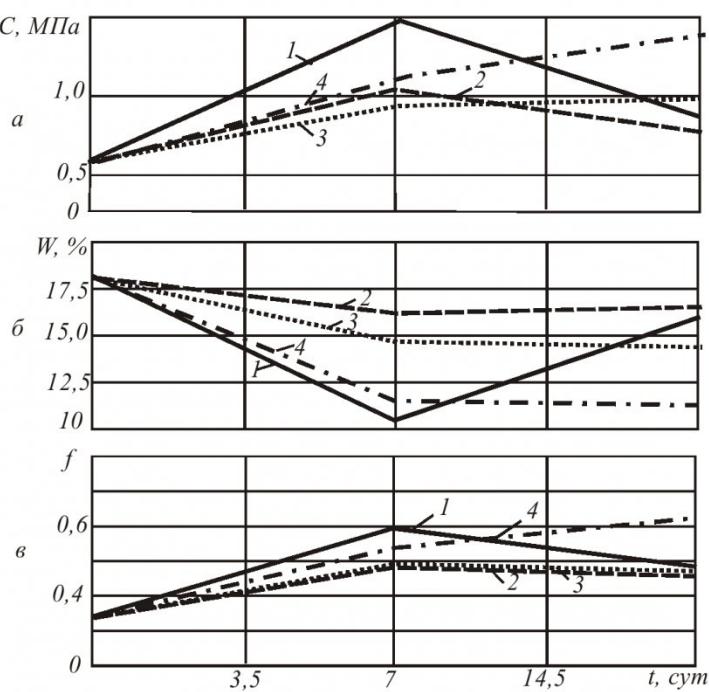


Рис. 6. Изменение сцепления грунта C (а), влажности W (б) и коэффициента внутреннего трения f (в) после окончания обработки: 1 – зона электроосмоса; 2 – средняя зона; 3 – зона электрохимической обработки при $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$; 4 – зона электрохимической обработки при $\gamma = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$

Основные технические характеристики прибора УК 14ПМ

– контролируемые частоты, МГц.....	0,06; 0,1
– диапазон измерения времени распространения УЗК, мкс.....	20-8800
– масса прибора, кг,.....	1,3

массива существенно изменилось. Во всех зонах через 7 сут после отключения электросиловой установки наблюдалось снижение уровня W , причем наиболее интенсивно – в зоне электроосмотического осушения. Через 14 сут влажность у катода (в зоне электроосмоса) начала увеличиваться, что свидетельствует о процессах вторичного увлажнения за счет инфильтрации грунтовых вод и атмосферной влаги (рис. 6, б).

Величина коэффициента внутреннего трения f выросла по сравнению с первоначальным значением во всех закрепляемых зонах, причем в период $t = 7-14$ сут она стабилизировалась на уровне $f = 0,46-0,64$ (рис. 6, б, в).

Контроль за физико-механическими свойствами глинистого массива осуществляли ультразвуковым прибором УК-14ПМ путем измерения времени распространения продольных ультразвуковых колебаний (УЗК) и длительности фронта первого вступления принятого сигнала теневым методом с помощью датчиков – пьезометрических преобразователей (ПЭП).

Основным акустическим параметром грунтов является скорость распространения продольной упругой волны V_p , которую формулой (в м/с)

$$V_p = L / T,$$

где L – база прозвучивания, м; T – время прохождения ультразвукового импульса, измеренное прибором, с.

С помощью ультразвукового прибора УК-14ПМ выполняли прозвучивание массива с поверхности в точках, расположенных на разных расстояниях от электродов-инъекторов.

Общая схема ультразвукового контроля за процессом ЭХЗ глинистых грунтов приведена на рис. 7.

через массив осуществлялось в различных точках зоны обработки на базе $L = 15$ см согласно схеме, приведенной на рис. 7, а также в зонах между электродами-инъекторами. Замеры производились прибором УК-14ПМ в моменты времени, указанные на планограмме (рис.

Измерение времени T прохождения ультразвуковой вол-

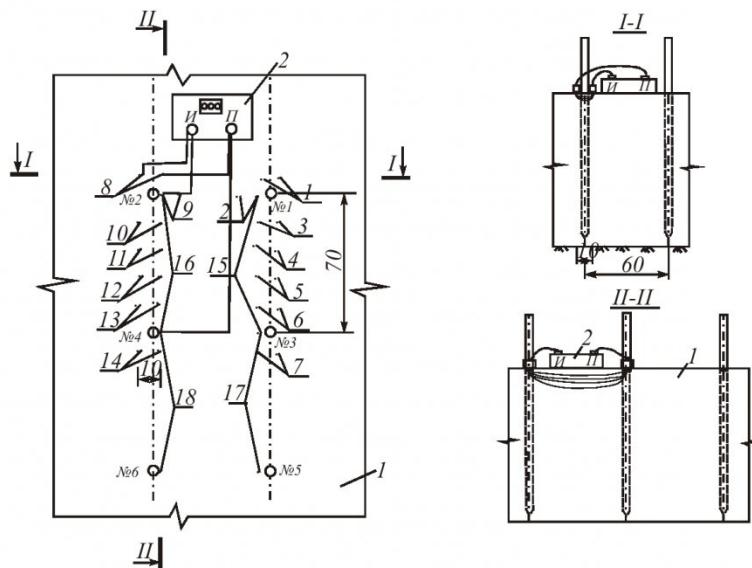


Рис. 7. Схема использования ультразвукового прибора УК-14 ПМ для контроля за состоянием закрепляемого массива:
I – участок закрепляемого массива; 2 – ультразвуковой прибор УК-14 ПМ; 3-20 – точки установки ПЭП

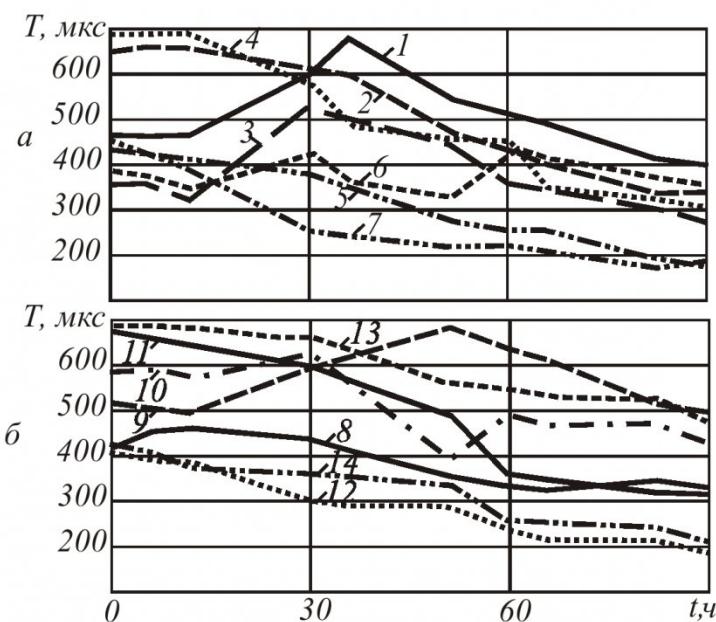


Рис. 8. Изменение времени прохождения ультразвуковой волны T через массив в зависимости от времени t обработки в зонах датчиков №1-7(а) и №8-14 (б) при $L = 15$ см:
1 – измерение в районе датчика-зонда №1; 2 – №2; 3 – №3; 4 – №4;
– №5; 6 – №6; 7 – №7; 8 – №8; 9 – №9; 10 – №10; 11 – №11; 12 – №12; 13 – №13; 14 – №14

2). По результатам проведенных измерений построены графики изменения времени прохождения ультразвуковой волны T через массив в зависимости от времени t обработки (рис. 8, 9).

С помощью экспериментальных графиков можно следующим образом охарактеризовать процессы, протекающие в трех характерных зонах ЭХЗ:

- в зоне электрохимической обработки (рис. 8, а, 1–3) за период $t = 30$ ч проходило локальное увеличение T , связанное с интенсивным перемещением естественной влаги по поровому пространству и частичной заменой ее более вязким укрепляющим раствором, в последующие 60 ч T уменьшалось, что свидетельствовало о насыщении этой части массива укрепляющим раствором;

- в зоне электроосмоса (рис. 9, а, 6–7) T уменьшалось монотонно, поскольку в эту зону перемещалась влага из средней зоны; увеличение значения T вокруг датчика-зонда №6 произошло из-за усадки грунта и образования локальной трещины в прикатодной зоне после 60 ч обработки;

- в средней зоне (рис. 8, а, 4–5) на протяжении всего эксперимента T снижалось наиболее равномерно, что связано с оттоком воды к отрицательным электродам.

Графики на рис. 8, б показали, что при уменьшении плотности жидкого стекла характер гидродинамических процессов в массиве качественно не изменяется, однако насыщение массива укрепляющим раствором происходит более равномерно.

Результаты ультразвуковых измерений на большой базе (рис. 9) свидетельствуют о том, что во всех зонах электрообработки преобладают процессы насыщения массива укрепляющим раствором, сопровождающиеся влагонасыщением пор и

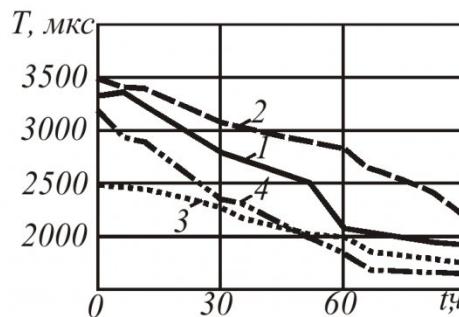


Рис. 9. Зависимость времени T прохождения ультразвуковой волны от времени t

обработки между электродами-инъекторами при $L = 60$ см:
1 – между электродами №1–3; 2 – между электродами №2–4; 3 – между электродами №3–5; 4 – между электродами №4–6

увеличением скорости распространения упругих колебаний. Диапазон изменения скоростей продольной волны составил от 47 до 98 % на различных стадиях обработки.

ВЫВОДЫ

1. Управление процессом ЭХЗ возможно путем подбора плотности γ укрепляющего раствора, изменяющейся для жидкого стекла в диапазоне $\gamma = 1,02\text{--}1,2 \text{ г}/\text{см}^3$, и плотности тока j , регулирование которой реализуется изменением напряжения U электросиловой установки в диапазоне $U = 10\text{--}200 \text{ В}$.

2. Процесс изменения тока I , расхода химических компонентов Q и количества отфильтрованной воды Q_e включает, как правило, три временных стадии: начальную, связанную с насыщением прианодных областей; основную, определяющую формирование зон электрохимического насыщения, электроосмотического осушения и переходной; заключительную, характеризующуюся стабилизацией гидродинамических явлений.

3. Основные физико-механические свойства массива в процессе ЭХЗ и после его окончания изменяются в весьма широких пределах: сцепление $C = 0,6\text{--}2,0 \text{ МПа}$; влажность $W = 10,5\text{--}18,0 \text{ \%}$; коэффициент внутреннего трения $f = 0,34$

0,62. В зоне электрохимического насыщения изменение всех параметров наибольшее и имеет необратимый характер; в зоне электроосмотического осушения первоначально эффект обработки может быть наибольшим, однако затем вследствие инфильтрации жидкости свойства пород практически полностью восстанавливаются; в переходной (средней) зоне диапазон изменения свойств массива наименьший.

4. Интегральный контроль процессов ЭХЗ по параметрам Q и I не обеспечивает достаточной информации о качестве обработки массива. Целесообразно на начальных стадиях технологии ЭХЗ для обеспечения оптимальных режимов управления параметрами j и U вести геофизический контроль как в межэлектродном пространстве, так и в отдельных точках массива в пределах трех указанных выше технологических зон. Одним из эффективных методов контроля при ЭХЗ является ультразвуковой в диапазоне частот $f = 60\text{--}100 \text{ кГц}$, обеспечивающий зондирование зоны обработки с поверхности на базах $L = 0,1\text{--}0,6 \text{ м}$, при этом диапазон изменения скоростей продольной волны в различных зонах обрабатываемого массива составляет 47–98 %.

□ Авторы статьи:

Покатилов

Андрей Владимирович
– аспирант каф. теоретической и
геотехнической механики

Простов

Сергей Михайлович
– докт. техн. наук, проф. каф. теорети-
ческой и геотехнической механики