

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 550.372: 622.267

С.М. Простов

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЛИНИСТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ТВЕРДЕНИИ ПОРОЗАПОЛНЯЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

Укрепление неустойчивых глинистых горных пород четвертичных отложений* является весьма актуальной проблемой при строительстве устьев шахтных стволов, выемок, насыпей, дамб, плотин, оснований зданий и сооружений, предотвращении обрушений бортов карьеров. Ввиду низкой проницаемости глинистых грунтов инъекция в них растворов возможна следующими методами:

- высоконапорная инъекция цементосодержащих растворов (при постоянном и импульсном давлении, струйная, электроискровая обработка), основанная на локальном гидрорасщеплении массива;
- нагнетание высокопроникающих химических растворов;
- электрохимическая обработка, сочетающая электроосмотическое осушение массива с его насыщением укрепляющей смесью за счет электро-кинетических процессов.

Данные технологии и происходящие при их реализации физические процессы изучены недостаточно. Одной из основных причин этого является отсутствие надежных информативных методов геоконтроля. Весьма перспективно применение в данном направлении геоэлектрического мониторинга.

Взаимосвязь электрофизических и прочностных свойств горных пород изучалась в связи с различными аспектами геотехнологии. В частности, в работах [1, 2] установлена зависимость удельного электросопротивления (УЭС) и прочности угля, насыщенного углекислым газом и метаном, которая обусловлена эффектами капиллярной конденсации и изменением при этом структуры материала.

Проблема прогнозирования прочностных, упругих и реологических свойств массивов трещиноватых горных пород, укрепленных инъекцией специальных растворов, решалась с помощью моделей двухкомпонентных сред. Расчетные методы реализованы с учетом экспериментальных зависимостей формирования системы "скрепляющий состав – порода" в реальном массиве и неполного заполнения пустот [3]. Наиболее распространенными методами инструментального контроля

процессов тампонажа и упрочнения пород являются прямые инженерно-геологические изыскания, гидро- и газодинамические испытания массива. Идея использования при последующей цементации электрофизических методов геоконтроля в комплексе с реометрическими предложена в работе [4]. Разработанные физические основы и схемы контроля реализованы при строительстве и ремонте подземных выработок на стадиях обоснования параметров технологии, производства нагнетательных работ и эксплуатации выработок [5].

В отличие от твердых пород, качество упрочнения которых достаточно полно оценивается объемом закачанного раствора и остаточной пустотностью, строительные свойства укрепленных связных и несвязных глинистых грунтов можно установить только непосредственно по прочностным параметрам.

Проведены лабораторные исследования изменения УЭС ρ песчанистых и глинистых грунтов, обработанных укрепляющими растворами. Измерения проводили в стандартных кубических ячейках четырехэлектродным методом с пластинчатыми питающими и стержневыми измерительными электродами на постоянном, низкочастотном ($f = 500$ Гц) и высокочастотном ($f = 20$ – 200 кГц) переменном токе (погрешность измерений истинных значений УЭС не превышала 2,2 %). Исследовали изменение УЭС грунтов, укрепленных цементно-песчаными смесями, а также раствором "жидкого стекла" Na_2SiO_3 с различной концентрацией и рецептками, обеспечивающими ускорение твердения смеси, повышение ее прочности и пластичности [6].

Наблюдения, характерные результаты которых приведены на рис. 1, показали, что при твердении цементно-песчаной смеси происходит монотонное увеличение ρ , причем введение электрически контрастной добавки NaCl увеличивало диапазон изменения ρ более чем на порядок.

Наибольший прирост ρ/ρ_0 зафиксирован на переменном токе, причем для цементной смеси при $f = 500$ Гц, а для силикатного раствора при $f = 100$ кГц. Данный эффект связан с увеличением доли реактивных токов в переменном электрическом поле. При повышении концентрации соли в растворе более 2 г/л темп роста ρ снижался. При

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

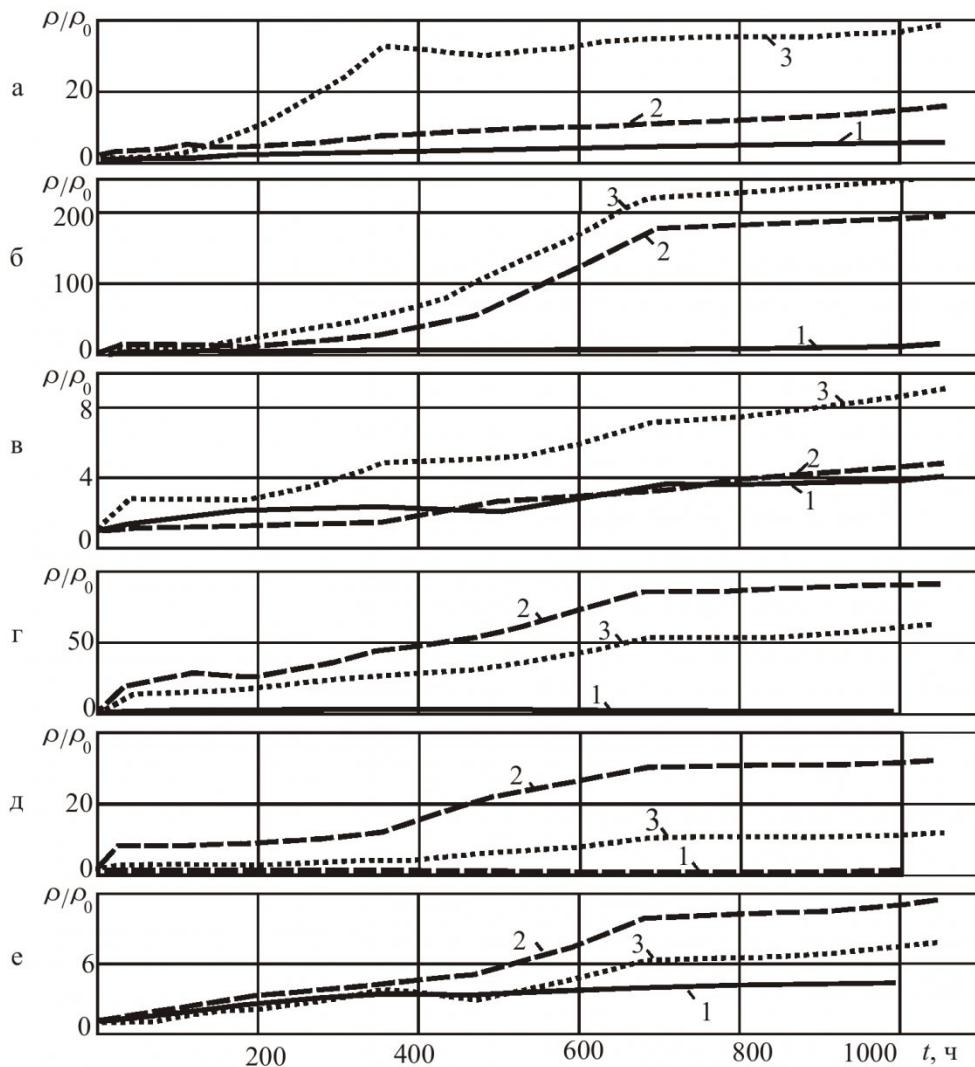


Рис. 1. Относительное изменение УЭС при наборе прочности для цементно-песчаной смеси ($P:C = 1:3$) (а, б, в), глинопесчаной смеси, укрепленной Na_2SiO_3 ($1,05 \text{ г/см}^3$) (г, д, е), без добавок (а, г), с добавкой поваренной соли ($0,1 \text{ г/л}$) (б, д) и 10 г/л (в, е): 1 – на постоянном токе; 2 – на низкочастотном переменном токе, 500 Гц ; 3 – на высокочастотном переменном токе, 100 кГц

твердении цементно-песчаной смеси, обработанной раствором Na_2SiO_3 , диапазон относительного увеличения ρ составил от 4 до 30.

Одновременное изменение электрофизических и механических свойств образцов пород обусловлено процессами химического связывания влаги с образованием в порах твердых соединений. Поэтому наличие зависимости между приращениями УЭС и прочностных параметров обработанных грунтов однозначно связано с изменением содержания влаги в образце. Данные связи могут использоваться для прогнозирования механических свойств упрочняемых грунтов без прямых механических испытаний.

В частности, для цементно-песчаной смеси получены графики зависимостей сцепления C и прочности при одноосном сжатии $\sigma_{c,s}$ от относительного изменения УЭС, которые при низких частотах имеют вид экспоненты, а в высокочастотном диапазоне приближаются к линейным

(рис. 2).

Для глинистых грунтов, насыщенных раствором "жидкого стекла", проведены комплексные исследования физических свойств при твердении смеси. Определяли сцепление C образцов, коэффициент внутреннего трения f , влажность W , консистенцию I_L , число пластичности I_P . Измерения проводили приборами полевой лаборатории ПЛЛ-9. Графики зависимостей параметров C, f, W, I_L и I_P от относительного изменения УЭС при твердении раствора различной плотности γ приведены на рис. 3.

Основные установленные закономерности состоят в следующем: величина контролируемого параметра ρ измерялась в диапазоне $\rho/\rho_0 = 1,1 - 1,68$, причем при применении более концентрированных растворов этот диапазон сужался за счет более низкого уровня значений ρ ; при всех значениях γ наблюдалось монотонное возрастание

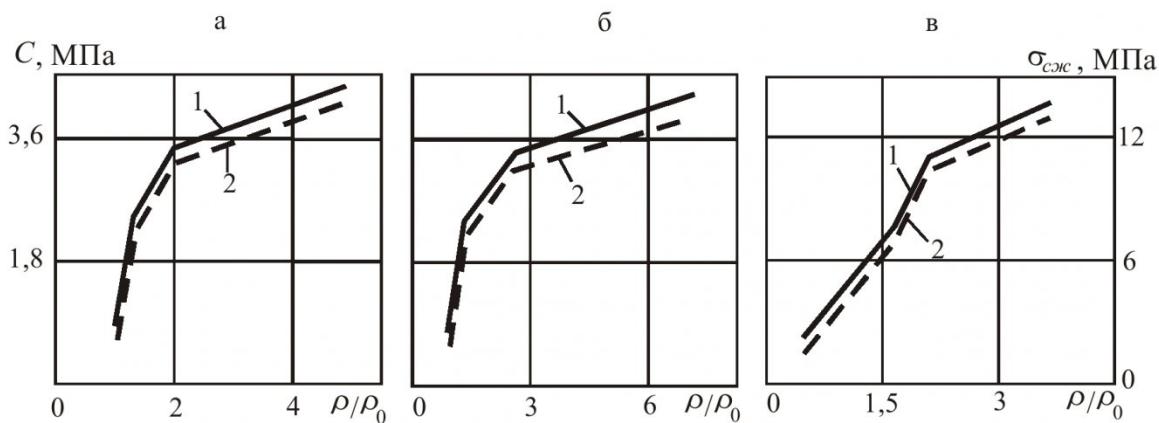


Рис.2. Зависимости изменения сцепления C и прочности $\sigma_{cж}$ зацементированных образцов от изменения УЭС на постоянном токе (а), при $f = 500 \text{ Гц}$ (б) и $f = 100 \text{ кГц}$ (в): 1 – C ; 2 – $\sigma_{cж}$

прочностных параметров C и f , монотонное снижение влажности W и консистенции I_L , число пластичности I_P при этом заметно возрастало только при $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$.

Полученные зависимости позволили разработать методики электрофизического контроля процессов набора прочности обработанными грунтами при цементационном и электрохимическом укреплении.

Исследованы изменения физических свойств грунтов при электрохимическом закреплении (ЭХЗ) на экспериментальной установке, которая представляла собой ванну из непроводящего материала, герметизированную полиэтиленовой

пленкой, размером $0,94 \times 0,5 \times 0,46 \text{ м}$. Рабочее пространство емкости было заполнено влагонасыщенным грунтом (суглинком с содержанием глинистых частиц до 40 %). Обработка массива проводилась электродами-инъекторами (перфорированными трубами с внешним диаметром 50 мм), подключенными к источнику постоянного напряжения. В качестве укрепляющего раствора в один из инъекторов-анод заливали раствор Na_2SiO_3 ("жидкого стекла") стандартной плотности $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$, из полости катода периодически удаляли воду, скапливающую за счет процессов электроосмотического осушения. Поскольку геометрические параметры установки соответствовали нату-

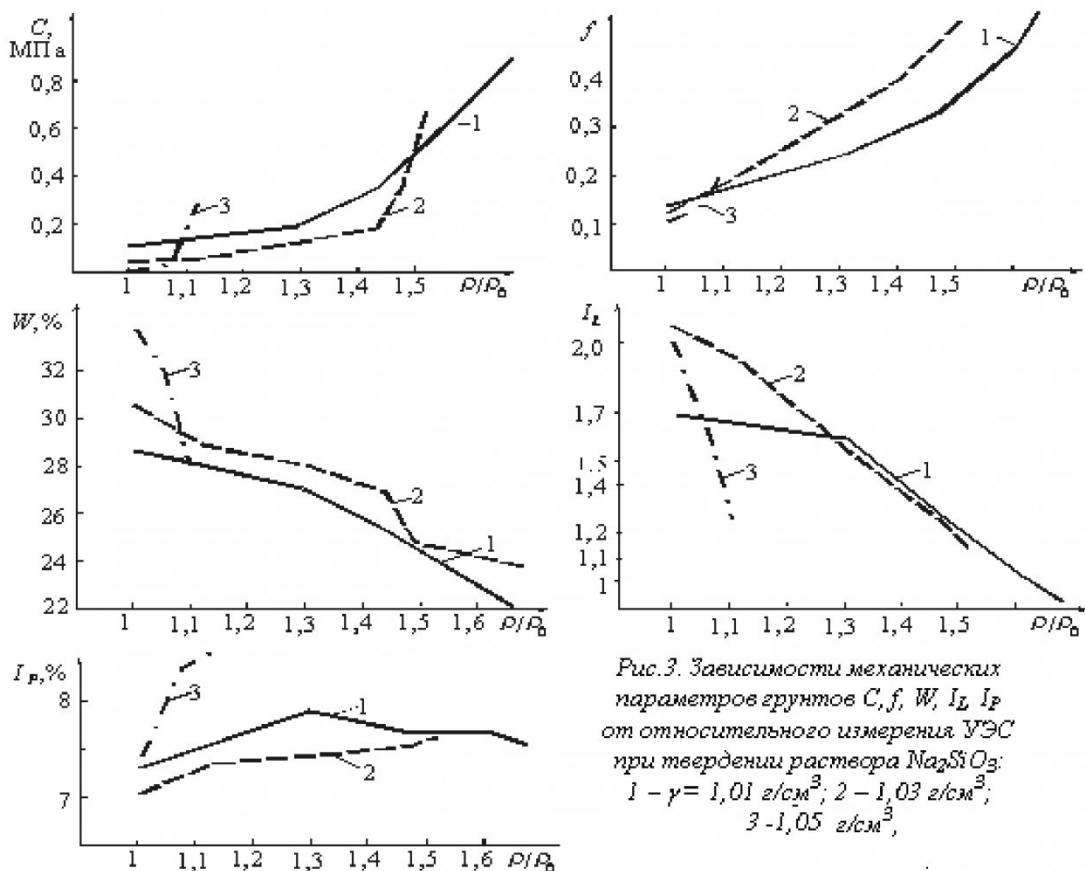


Рис.3. Зависимости механических параметров грунтов C, f, W, I_L, I_P от относительного измерения УЭС при твердении раствора Na_2SiO_3 :
1 – $\gamma = 1,01 \text{ г}/\text{см}^3$; 2 – $\gamma = 1,03 \text{ г}/\text{см}^3$;
3 – $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$.

ре, применения критериев подобия при моделировании не требовалось.

В грунте были установлены 4-электродные микрорадиоточки (AM = MN = NB = 1 см), измерения УЭС массива проводили каротажным прибором КП-2. Датчики устанавливали в средней по глубине плоскости модели по оси установки и в радиальных от электродов направлениях. Общее количество датчиков в зависимости от решаемых задач составляло от 15 до 30. Подробнее установка описана в [7].

Наиболее характерные результаты эксперимента приведены на рис. 4.

Анализ круговых диаграмм УЭС (рис. 4, а, б) показал, что при консолидации обработанного грунта вблизи электрода ($r = 0,07$ м) происходит образование трещин расслоения, расположение которых соответствует угловой координате, $\varphi = 45, 315^\circ$, а при удалении от инъектора ($r = 0,14$ м) зона набора прочности вытягивается вдоль оси установки. Контролируемые физические параметры W , f и C массива, монотонно изменялись во времени (рис. 4, в), в то же время набор прочности грунта вдоль оси установки происходил весьма неравномерно: на интервале $x = 0,26\text{--}0,45$ м (в зоне активного анода) величина сцепления C возросла более чем в 6 раз, причем набор прочности

происходил относительно равномерно во времени; в средней части зоны обработки ($x = 0,08\text{--}0,26$ м) процессы консолидации массива происходили значительно менее интенсивно (рис. 4, г).

На опытном полигоне ООО "Нооцентр-Д" (г. Кемерово) были проведены комплексные исследования физических свойств при высоконапорной инъекции цементного раствора.

Технология закрепления состояла в следующем. На участке изготовления буроинъекционных свай бурили лидерные скважины на глубину 0,6–0,7 м, через которые задавливались перфорированные инъекторы на глубину 5,5 м. В устьевой части инъекторов на глубину 0,5 м выполнен тампонаж затрубного пространства раствором на расширяющемся цементе. После монтажа инъекторов производились работы по устройству железобетонного ростверка, а затем осуществлялось поочередное нагнетание в инъекторы цементно-песчаного раствора.

Раствор имел следующий состав (на 1 м³): песок мелкий с примесью глинистых частиц до 2 % и пылеватых частиц до 20 % – 1150 кг; портландцемент марки М400 – 750 кг; вода – 450 л; специальные патентованные добавки.

Основные этапы эксперимента состояли в следующем:

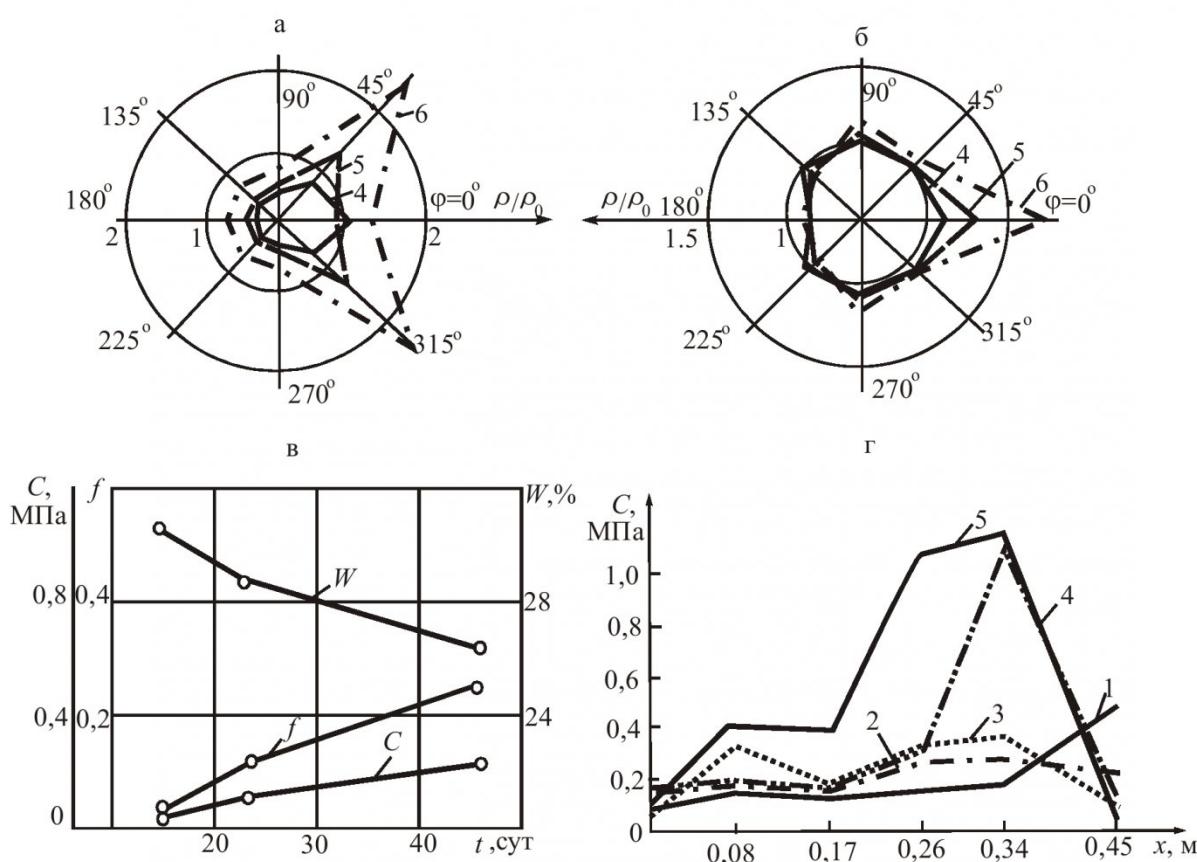


Рис. 4. Круговые диаграммы изменения УЭС обработанного грунта на стадии набора прочности на расстоянии от анода $r = 0,07$ м (а) и $r = 0,14$ м (б) с течением времени t после обработки; изменение средних значений параметров C , f , и W при $r = 0,07$ м (в), прогнозируемое изменение сцепления C грунта в обработанной зоне вдоль оси x установки: 1 – $t = 1$ сут.; 2 – 5 сут.; 3 – 15 сут.; 4 – 23 сут.; 5 – 46 сут.

- определение физико-механических свойств грунтов в естественном состоянии путем колонкового бурения скважин с отбором образцов грунтов и их механических испытаний в лабораторных условиях, а также статических зондирований грунтового массива;

- контроль изменения электрофизических свойств грунтов при закачке цементного раствора с применением различных схем бесскважинной электроразведки;

- контроль изменения физико-механических и электрических свойств грунтов в зоне распространения цементного раствора в процессе его твердения и набора прочности.

Было пробурено 2 скважины на глубину 8 м с полным объемом инженерно-геологических исследований (выполнено ООО "КузбассТИСИЗ"). Проведена опытная закачка цементного раствора в 15 скважин на глубину 6 м с параллельными геофизическими исследованиями, выполнено статическое зондирование грунтов в зоне инъекции на глубину до 6 м через 0,2 м с общим объемом полевых испытаний 210 м в комплексе с электрофизическими измерениями в зоне обработки массива.

Статическое зондирование грунтов выполнено по методике, регламентированной ГОСТ 20069-81 и предусматривающей погружение зонда в грунт с постоянной скоростью в диапазоне 0,5–1 м/мин с помощью силовой установки, с фиксированием сопротивления грунта погружению конуса q_3 , удельного сопротивления на фрикционной муфте трения зонда f_3 и последующим расчетом физико-механических параметров грунтов по стандартной методике (СП 11-105-97). Применилась следующая аппаратура: прибор электромеханического каротажа ПТП-М в комплекте с тензометрическим зондом "Пика" (разработан НПО "ГЕОТЕСТ", отарирован с использованием образцового динамометра ДОСМ-3 и индикатора UZ-10), силовая установка УГБ-1ВС.

Бесскважинные электрофизические измерения на стадии твердения инъекционного раствора проводили по следующей методике: в качестве заземляющих электродов использовали трубы инъекторов с заглублением 6 м, расположенные по одной оси на расстоянии 1 м; применяли четырехэлектродную установку А1,0М1,0Н1,0В. Наблюдения проведены по 17 инъекторам: механические – в течение 46 дней, электрофизические – 96 дней.

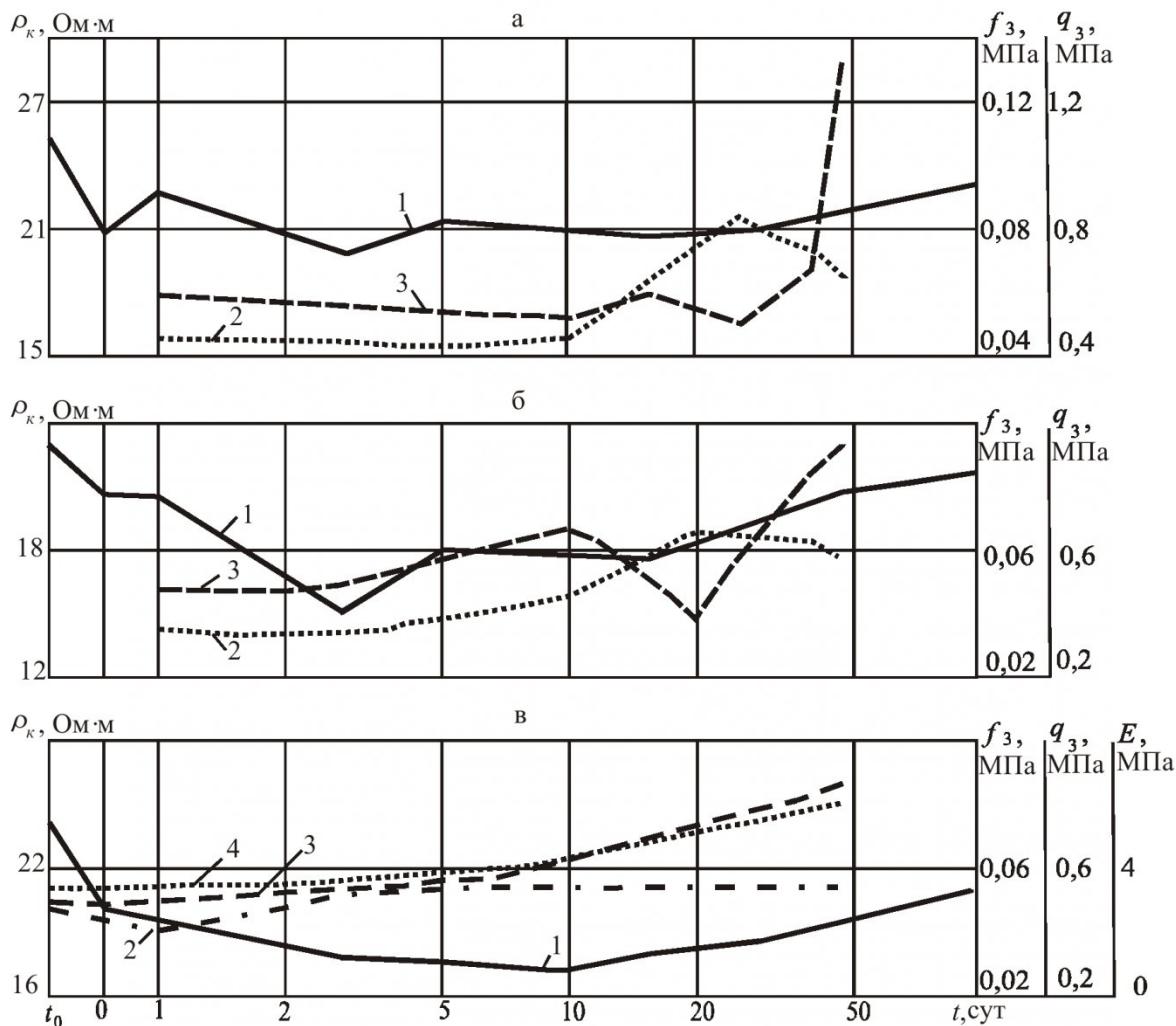


Рис. 5. Изменение УЭС и механических параметров f_3 , q_3 , E в зоне укрепления скв. №3 (а), №5 (б) и в среднем по всем скважинам опытного участка (в): 1 – ρ_k ; 2 – f_3 ; 3 – q_3 ; 4 – E

Для контроля изменения электрофизических свойств массива по глубине применяли вертикальное электрическое зондирование с земной поверхности по схеме АМ = MN = NB, AB = 3–40 м, а также бесконтактный индукционный каротаж в скважине, осаженной полиэтиленовой трубой, параллельной инъекционной. Аппаратура индукционного метода описана в [8]. Величина контролируемого этим методом параметра ε пропорциональна силе вихревых токов, наводимых в массиве переменным электромагнитным полем с частотой $f = 50$ кГц, и обратно пропорциональна УЭС среды.

По результатам инженерно-геологического исследования скважин укрепляемый массив слагается из следующих слоев: влажные насыпные грунты (уровень подземных вод находится на отметке $h = 1,4$ м) мощностью 1,5 м; почвенный слой мощностью 0,6 м; слой суглинка бурого (плотность $\gamma = 1,92$ г/см³; показатель текучести $I_L = 0,82\text{--}0,93$, модуль деформации $E = 1,9\text{--}2,2$ МПа; удельное сцепление $C = 10\text{--}15$ кПа, угол внутреннего трения $\varphi = 9\text{--}19^\circ$); слой суглинка серого аллювиального ($\gamma = 1,8\text{--}1,93$ г/см³, $I_L = 0,37\text{--}0,9$, $E = 1,8\text{--}3,2$ МПа, $C = 12\text{--}32$ кПа, $\varphi = 14\text{--}21^\circ$), ниже которого с отметки $h = 7,0$ м залегает слой плотных тугопластичных суглинков. Данные по интервальному статического зондирования свидетельствуют о том, что наименее прочный слой суглинков находится на интервале $h = 2,6\text{--}5,2$ м. Он характеризуется минимальными значениями параметров $q_3 \leq 0,2$ МПа и $f_3 \leq 0,04$ МПа. Приведенные данные показывают, что геологический

разрез даже в пределах весьма ограниченного участка, намеченного для укрепления, весьма неоднороден по физико-механическим свойствам, влажности и гранулометрическому составу [9].

Поскольку электрофизический метод характеризует изменение физического состояния не в точке, а в контролируемом объеме, сопоставление его результатов с данными полевых механических испытаний возможно только на уровне интегральных показателей. На рис.5 представлены графики комплексного контроля качества укрепления по инъекционным скважинам №№ 3 и 5, а также усредненные по всем 17 скважинам, позволяющие проанализировать общие тенденции изменения контролируемых параметров.

Непосредственно после закачки раствора эффективное УЭС массива ρ_k уменьшается на 20–30 %, на интервале $t = 1\text{--}10$ сут. оно стабилизируется, а затем начинается его монотонное повышение, однако за интервал наблюдения около 100 сут. начальное значение ρ_k не было достигнуто ни по одному опытному участку.

Основной причиной различия в результатах лабораторных и полевых исследований является отсутствие дренажа влаги в полевых условиях, поэтому при заполнении пор грунта цементно-песчаной смесью, ее твердении и соответствующем уменьшении объема пор влажность породы изменяется в значительно меньшей степени. Рост средних прочностных параметров f_3 , q_3 и E (рис.5, в) наблюдается практически с момента $t = 1$ сут., в то время как по скв. №3 имеет место снижение f_3 и q_3 на интервале $t = 1\text{--}10$ сут., а также локальное

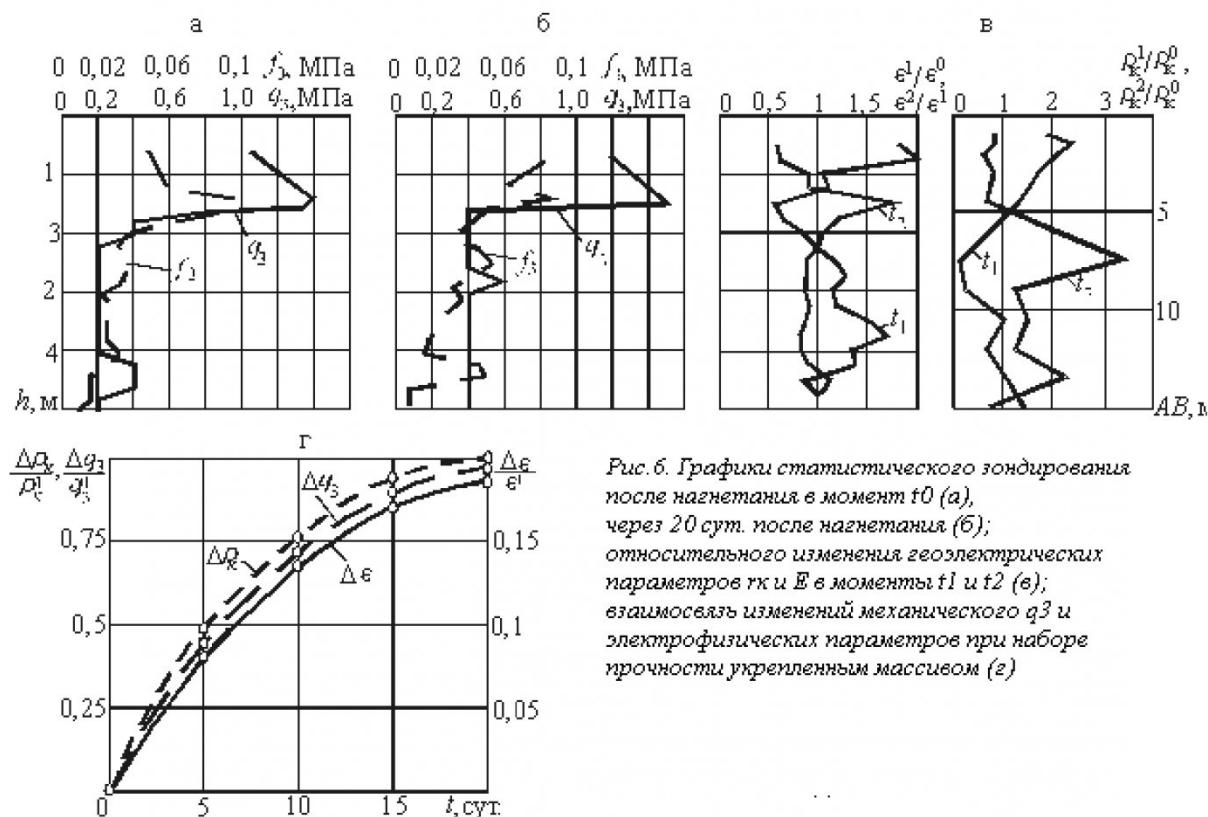


Рис. 6. Графики статистического зондирования после нагнетания в момент t_0 (а), через 20 сут. после нагнетания (б); относительного изменения геоэлектрических параметров r_k и E в моменты t_1 и t_2 (в); взаимосвязь изменений механического q_3 и электрофизических параметров при наборе прочности укрепленным массивом (г)

снижение q_3 при $t = 15\text{--}30$ сут. (скв. №3) и $t = 10\text{--}20$ сут. (скв. №5). Таким образом, при совпадении характеров графиков $\rho_k(t)$ и f_3 , q_3 , $E(t)$ при $t > 10$ сут. по отдельным участкам контроля наблюдались отдельные аномалии, обусловленные значительно большей базой электрофизических измерений. Зафиксированное среднее увеличение модуля деформации E укрепленного грунта составило более 85 %, среднее увеличение УЭС при этом превысило 25 %.

Результаты исследований геомеханических процессов по глубине массива приведены на рис.6. Для интерпретации данных геоконтроля приведены графики изменения параметров статического зондирования q_3 и f_3 по глубине h , а также относительных значений геоэлектрических параметров: $\rho_k^1 / \rho_k^0(AB)$ и $\varepsilon^1 / \varepsilon^0(h)$ в момент t_1 непосредственно после нагнетания; $\rho_k^2 / \rho_k^1(AB)$ и $\varepsilon^2 / \varepsilon^1(h)$ на стадии твердения в момент $t_2 = 20$ сут. после нагнетания.

Совместный анализ результатов геоконтроля позволяет сделать следующие основные выводы о геомеханических и гидродинамических процессах в контролируемой зоне:

- нагнетание раствора привело к отжиму поверхностного слоя массива и образованию зоны повышенных пустот на интервале $h = 1,25\text{--}1,75$ м под действием инъекционного давления (данному интервалу соответствуют отрицательная аномалия ε и положительная ρ_k); на участке, прилегающем к тампону ($h = 0,5\text{--}1$ м), произошел прорыв раствора с выходом его на поверхность в объеме 20–30 л (на данном интервале положительное приращение ε), зона прорыва не распространяется в глубину массива, так как на графике $\rho_k(AB)$ отрицательных аномалий не обнаружено; в дальнейшем на интервале $h = 1,25\text{--}2$ м произошло частичное заполнение увеличившегося при нагнетании объема пустот, остаточные пустоты оказались заполненными природной влагой (рис. 6, а, в);

- наибольшее проникновение раствора в массив произошло на интервале $h = 2,25\text{--}4,25$ м, соответствующем расположению наиболее слабого слоя (на данном интервале имеют место положи-

тельная аномалия ε и отрицательная ρ_k), что свидетельствует о положительном эффекте обработки массива, заключающемся в закреплении наименее прочного участка, определяющего несущую способность массива; в результате твердения раствора произошло заполнение пустот цементно-песчаным раствором, сопровождающееся вытеснением природной жидкости; в пределах этой зоны прочностные параметры массива возросли до значений $q_3 = 0,4$ МПа и $f_3 = 0,04$ МПа, приращение геоэлектрических параметров составили $\Delta\rho = 100\%$, $\Delta\varepsilon = 18\%$ (рис. 6, б, в).

Сопоставление комплекса контролируемых параметров позволило получить график взаимосвязи между ними (рис. 6, г), применение которого обеспечивает прогноз изменения прочности массива на последующих участках ведения горно-строительных работ.

По результатам производственных исследований разработаны рекомендации по совершенствованию технологии высоконапорной инъекции цементных растворов в глинистые горные породы [10].

ВЫВОДЫ

1. Между приращениями параметров прочности массива глинистых горных пород, укрепленного цементными или химическими растворами, (сцепления, предела прочности при сжатии, усилия вдавливания конуса) и удельного электросопротивления (УЭС) имеют место зависимости, близкие к линейным. При этом диапазон увеличения УЭС при дренировании влаги (лабораторный образец, участок массива с предварительным осушением) достигает 30 раз, а при отсутствии дренажа – не превышает 70–100 %.

2. Применение геоэлектрического контроля зоны укрепления с помощью заглубленных стационарных микродатчиков, скважинного индукционного каротажа, бесскважинного зондирования или профилирования обеспечивает контроль в пространстве и во времени процессов инъекционного и электрохимического упрочнения на стадии набора прочности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахов, А. В. Особенности механических и электрофизических свойств газонасыщенного угля / А. В. Астахов, С. П. Хазов, Д. П. Широчин, Л. Н. Экономова // ФТПРПИ.– 1990.– №5.
2. Астахов, А. В. Влияние капилярного конденсата метана на электрофизические и прочностные свойства угля / А. В. Астахов, С. П. Хазов, Л. Н. Экономова // ФТПРПИ.– 1992.– №3.– С. 27–32.
3. Кондратов, А. Б. Исследование и прогнозирование основных физико-механических свойств породного массива при инъекционном укреплении / А.Б.Кондратов, А.А.Барях // ФТПРПИ.– 1981.– №5.– С. 29–38.
4. Хямяляйнен, В. А. Контроль состояния породного массива вокруг выработок при последующей цементации // ФТПРПИ.– 1994.– №3.– С. 37–44.
5. Хямяляйнен, В. А. Геоэлектрический контроль разрушения и инъекционного упрочнения горных пород / В.А.Хямяляйнен, С.М.Простов, П.С.Сыркин.– М.: Недра, 1996.– 288 с.
6. Простов, С. М. Электросопротивление влагонасыщенных грунтов и пород при инъекционном

- укреплении / С. М. Простов, М. В. Гуцал, Р. Ф. Гордиенко // Вестн. КузГТУ. – 2002. – №6. – С. 12–17.
7. Простов, С. М. Исследование параметров грунтов при электроосмотическом и электрохимическом укреплении на экспериментальной модели / С. М. Простов, М. В. Гуцал, А. В. Покатилов // Вестн. РАЕН (Зап.-Сиб.отд.). – 2004. – №6. – С. 128–134.
8. Простов, С. М. Электромагнитный бесконтактный геоконтроль / С. М. Простов, В. А. Хямляйнен, В. В. Дырдин // КузГТУ, Кемерово, 2002. – 132 с.
9. Простов, С. М. Комплексный контроль качества укрепления неустойчивых грунтов инъекционными растворами / С.М.Простов, М.В.Гуцал, О.В.Герасимов // Вестн. ТГАСУ. – 2003. №1. – С. 231–237.
10. Простов, С. М. Комплексный геоконтроль процессов инъекционного закрепления влагонасыщенных грунтов / С.М.Простов, О.В.Герасимов, Е.А.Мальцев // Вестн. КузГТУ. – 2003.- №3. – С. 17–21.

□ Автор статьи:

Простов
Сергей Михайлович
- докт. техн. наук, проф. каф.едры теоретической и геотехнической механики

УДК 622.822

В.А.Портола

ОЦЕНКА ПОЖАРООПАСНЫХ СКОРОСТЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СКОПЛЕНИЕ УГЛЯ

Рост глубины горных работ шахт и увеличение производительности угледобывающей техники сопровождается повышением выделения метана, что снижает безопасность труда из-за возможности образования взрывоопасных концентраций горючих газов, сдерживает темпы угледобычи. Для борьбы с метаном все большее распространение находят комбинированные схемы проветривания выемочных участков, дегазация выработанного пространства. Однако, наряду с положительными эффектами применяемых схем проветривания – снижением количества выносимого в действующие горные выработки горючего газа, уменьшением концентрации метана в атмосфере выработанного пространства, существует и отрицательный момент. Так, при борьбе с метаном существенно увеличивается количество проходящего

через выработанное пространство воздуха, возрастает концентрация кислорода в рудничной атмосфере. В результате активизируется окисление теряемого угля, что может влиять на эндогенную пожароопасность шахт.

Практика показывает, что наиболее часто самовозгораются скопления угля, образующиеся у теряемых в выработанном пространстве целиков угля (в монтажных, демонтажных камерах, вдоль вентиляционных, конвейерных штреков), а также в зонах геологических нарушений, где уголь, как правило, имеет повышенную химическую активность. Время разогрева угля в процессе самовозгорания сокращается с ростом концентрации кислорода в окружающей атмосфере, химической активности угля и удельного количества тепла, возникающего при взаимодействии

кислорода с активными центрами угля.

Скорость проходящего через скопление угля воздуха оказывает двоякое влияние на процесс самовозгорания. Фильтрующийся через выработанное пространство воздух с одной стороны способствует развитию процесса самовозгорания, доставляя необходимый кислород, с другой стороны тормозит его, вынося часть образуемого тепла и охлаждая угольное скопление. В настоящее время нет единого мнения о пожароопасных скоростях фильтрации воздуха через уголь. Так, в [1,2] утверждается, что самовозгорание угля развивается при скорости воздуха в пределах 10^{-5} - 10^{-4} м/с. Возможность повышения температуры угля только за счет молекулярной диффузии кислорода показана в [3]. Моделирование в лабораторных условиях [4] выявило, что разогрев угля

Изменение химической активности угля, средней температуры сечения очага, минимальной и максимальной скорости фильтрации воздуха в зависимости от температуры очага

| t_0 , $^{\circ}\text{C}$ | 50 | 100 | 200 | 300 | 500 | 800 | 1000 |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $U, \text{м}^3/(\text{кг с})$ | $26 \cdot 10^{-9}$ | $47 \cdot 10^{-9}$ | $89 \cdot 10^{-9}$ | $131 \cdot 10^{-9}$ | $215 \cdot 19^{-9}$ | $341 \cdot 10^{-9}$ | $425 \cdot 10^{-9}$ |
| t_c , $^{\circ}\text{C}$ | 26 | 43,3 | 71,6 | 97,3 | 143,7 | 207,4 | 246,8 |
| v_{\min} , м/с | $4,6 \cdot 10^{-6}$ | $8,3 \cdot 10^{-6}$ | $1,5 \cdot 10^{-5}$ | $2,5 \cdot 10^{-5}$ | $3,4 \cdot 10^{-5}$ | $5,3 \cdot 10^{-5}$ | $6,6 \cdot 10^{-5}$ |
| v_{\max} , м/с | $3,8 \cdot 10^{-3}$ | $4,5 \cdot 10^{-3}$ | $5,6 \cdot 10^{-3}$ | $6,5 \cdot 10^{-3}$ | $7,8 \cdot 10^{-3}$ | $9,0 \cdot 10^{-3}$ | $9,7 \cdot 10^{-3}$ |

Таблица 1