

УДК 624.131.5: 550.372

О. В. Герасимов, С. М. Простов, Д. Ю. Пахомов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ГРУНТОВ, УКРЕПЛЯЕМЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОНАПОРНОЙ ИНЬЕКЦИИ

Аналитическими и лабораторными исследованиями<sup>1</sup>, описанными в работе [1], установлена взаимосвязь пористости, влагонасыщенности и изменения агрегатного состояния укрепляющего заполнителя пор глинистых грунтов четвертичных отложений с их электрофизическими свойствами. Проведенные натурные производст-

скважинах обеспечивают детальный контроль в пространстве и во времени процессов развития при высоконапорной инъекции локальных зон микроразрывов, заполнения их цементно-песчаным раствором, перехода раствора в твердое состояние и связывания частиц грунта.

Для установления зависимости между изменениями фи-

грунтов прибором электромеханического каротажа ПТМ-М в комплекте с тензометрическим зондом НПО "Геотест" и силовой установкой УГБ-1ВС;

- геофизические работы.

Геологические изыскания проводились по двум разведочным скважинам. Характерный разрез скважин и показатели физико-механических свойств

Таблица 1

Геологический разрез массива полигона ООО "Нооцентр-Д"

№ слоя	Глубина по- дышвы слоя, м	Мощность слоя, м	Описание грунта	Разрез сква- жины	Подземные во- ды	Показатели физико-механических свойств грунтов:				
						плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	конистен- ция $I_L$	$E$	угол внут- реннего напления $\varphi$ , град	сцепление $C$ , МПа
1	1,6	1,6	Насыпной грунт влажный		1,40					
2	2,1	0,5	Почва суглини- стая			1,87	0,93	1,9	9	0,01
						1,89	0,82	2,2	19	0,015
3	3,6	1,5	Суглинок бурый пылеватый мак- ропористый мя- копластичный			1,89	0,76	1,8	14	0,02
						1,8	0,9	2,6	19	0,012
4	7,0	3,4	Суглинок серый аллювиальный пылеватый мя- ко-текуче- пластичный			1,93	0,61	2,6	17	0,021
						1,85	0,37	3,0	21	0,032
5	8,0	1,0	Суглинок более плотный тугопла- стичный							

венные эксперименты [2- 4] показали, что геоэлектрические измерения по схемам вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), электропрофилирования (ЭП) на земной поверхности, а также индукционного каротажа в обсаженных

зико-механических и электрофизических свойств укрепляемых грунтов на опытном полигоне ООО "НООЦЕНТР-Д", расположенному в Заводском районе г. Кемерово, были выполнены следующие экспериментальные исследования:

- геологические изыскания;

- опытное закрепление грунтов по специальной технологии, разработанной ООО "НООЦЕНТР-Д";

- статическое зондирование

представлены в табл. 1.

Закрепление грунтов производилось в 29 инъекторах, установленных на площади более 500 м<sup>2</sup>. Статическое зондирование проводилось в 35 точках поинтервално с шагом 0,2 м на глубину до 8 м. Характерные результаты статического зондирования на различных стадиях укрепления массива в течение 46 сут наблюдений приведены ниже. Полевые электрофизические исследования включали

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ по проекту 05-05-64100

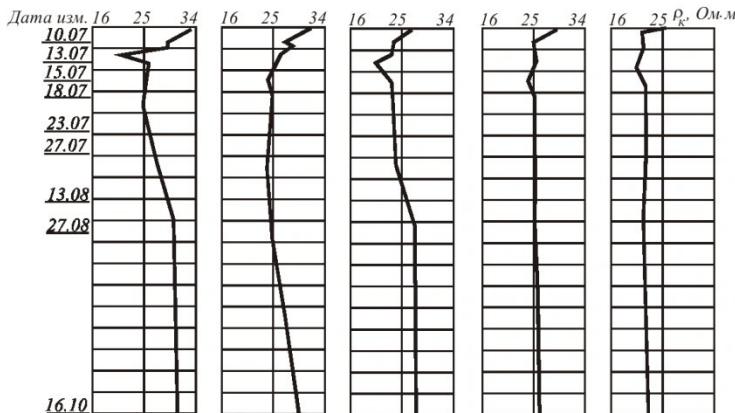


Рис.1. Характерные графики изменения средних значений эффективного УЭС методом ВЭЗ на участках статического зондирования

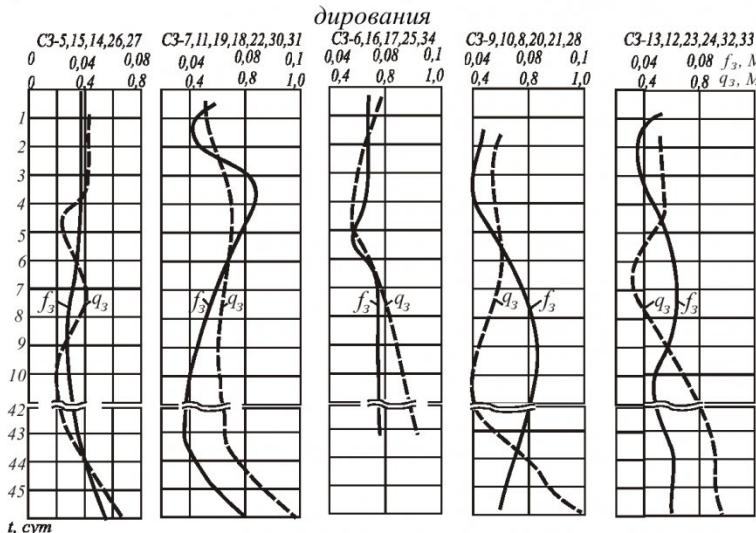


Рис.2. Характерные результаты статического зондирования на различных стадиях укрепления массива с течением времени  $t$ : C3-5 ...C3-34 – номера точек статического зондирования

измерения по схемам ВЭЗ, отбор проб и проведение лабора-

торных испытаний электрофизических свойств образцов грунтов.

До начала работ по установке инъекторов выполнено круговое ВЭЗ (зондирование с поворотом оси установки вокруг центра на угол 60–90°). Практически на всей глубине зондирования анизотропия свойств грунтов незначительна, коэффициент анизотропии не превышал  $K_a = 1,15$ . Через 3 дня после закачки цементного раствора на повторном круговом ВЭЗ коэффициент анизотропии на разносах от  $AB = 3$  м до  $AB = 8$  м изменялся в диапазоне  $K_a = 1,5–1,63$ . Так как на больших разносах влияние инъектирования не сказывалось, глубина проникновения раствора составляет 4–6 м. Таким образом, граница зоны инъекции расположена в верхней части слоя 4 (табл. 1).

Характерные графики изменения во времени средних значений эффективного удельного электросопротивления (УЭС)  $\rho_k$  методом ВЭЗ на участках статического зондирования приведены на рис. 1. Измеренные величины УЭС грунта монолитов, отобранных из технических скважин, составили  $\rho = 18–24$  Ом·м. Анализ графиков

Таблица 2

Результаты статистической обработки зависимости между  $\Delta q_3$ ,  $\Delta f_3$  и  $\Delta \rho_k$

Показатель	Результаты расчета		
Уравнение	$\Delta q_3 = a + b\Delta\rho_k$	$\Delta q_3 = a + b \ln \Delta\rho_k$	$\Delta q_3 = a + b\Delta\rho_k + c(\Delta\rho_k)^2$
$a$	0,16283	1,01625	-0,61152
$b$	0,029476	0,050239	0,0414886
$c$	-	-	-0,0074172
$R, r$	0,88161	0,78635	0,98729
$t$	3,23537	2,20467	10,7611
$\delta$	0,14234	0,18632	0,04793
$\Delta$	0	0,01002	9,55E-12
Уравнение	$\Delta f_3 = a + b\Delta\rho_k$	$\Delta f_3 = a \exp(b\Delta\rho_k)$	$\Delta f_3 = a + b\Delta\rho_k + c(\Delta\rho_k)^2$
$a$	0,01549	0,01843	-0,01469
$b$	0,00687	1,12610	0,016369
$c$	-	-	-0,010685
$R, r$	0,85629	0,80433	0,94862
$t$	2,87150	2,34461	5,19252
$\delta$	0,00661	0,0076	0,00405
$\Delta$	0	3,61E-04	2,98E-13

$\rho_k(t)$  показывает, что электросопротивление после закачки раствора падает с 34 до 20 Ом·м, в течение 10–15 дней остается на этом уровне, а затем постепенно растет, достигая за 80 дней значений  $\rho_{k0}$ , зафиксированных до начала эксперимента. Признаком проникновения раствора в грунт является понижение УЭС, а набор прочности массива сопровождается последующим его увеличением. Измеренные в процессе обработки массива значения  $\rho_k$  могут быть использованы как показатель качества закачки раствора при экспресс-контrole.

На рис. 2 представлены графики изменения во времени средних значений параметров статического зондирования  $q_3(t)$  и  $f_3(t)$ , полученные в ходе долговременных исследований.

Величина  $q_3$  представляет собой сопротивление вдавливанию наконечника в грунт, а  $f_3$  – сопротивление муфты скольжения при повороте наконечника. Из графиков следует, что в процессе инъекционного укрепления прочностные свойства массива изменяются неравномерно: после насыщения цементным раствором прочность грунтов снижается вследствие повышения уровня влажности, причем эта фаза составляет от 1,5–2 сут до 10 сут, затем происходит постепенное увеличение прочностных параметров, к концу наблюдений показатели  $q_3$  и  $f_3$  превышали исходные значения в 1,5–2 раза.

Проведена статистическая обработка результатов комплексных экспериментальных исследований с помощью программы "Статистика", разработанной в КузГТУ. Установлены корреляционные зависимости между изменениями механических и электрофизических параметров массива. Результаты обработки приведены в табл. 2 и

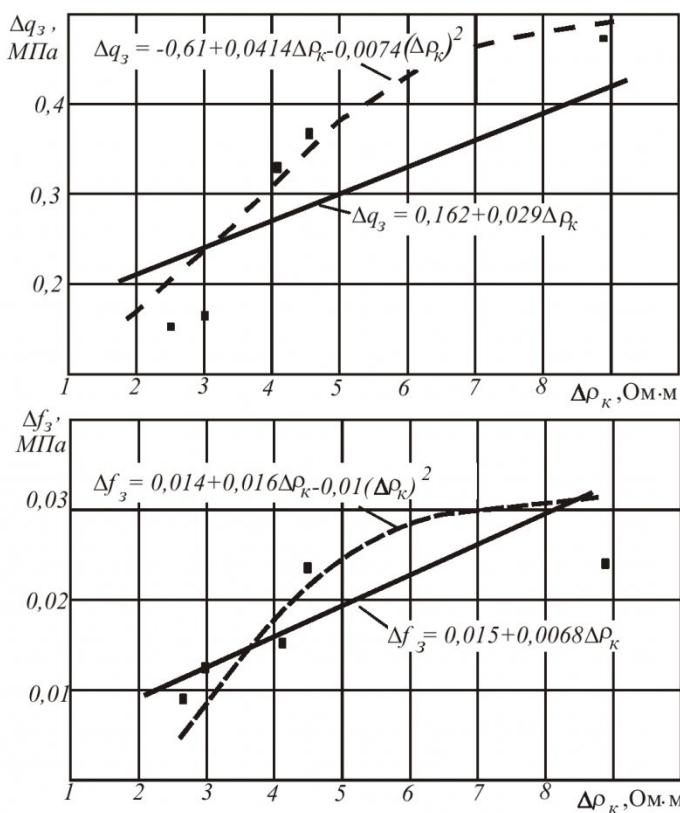


Рис. 3. Корреляционные зависимости между изменениями механических и электрофизических свойств массива

на графиках рис. 3.

При обработке за приращения величин  $q_3$ ,  $f_3$  и  $\rho_k$  принималась разница между соответствующими минимальным и максимальным зафиксированными значениями параметров контрольного участка полигона на стадии набора прочности массивом. В табл. 2 указаны следующие числовые параметры:  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты, входящие в уравнения регрессии;  $R(r)$  – регрессионное отношение (коэффициент корреляции);  $t$  – критерий надежности оценки;  $\delta$  – остаточное среднеквадратичное отклонение;  $\Delta$  – средняя невязка.

Анализ полученных результатов показывает, что целесообразно зависимость между параметрами  $q_3$ ,  $f_3$  и  $\rho_k$  принять ли-

нейными (для этой зависимости коэффициент корреляции составляет  $r = 0,85\text{--}0,88$ ). Для оперативного прогноза изменения прочностных параметров массива следует применять следующие уравнения:

$$f_3(t) = f_{30} \cdot \frac{\rho_k(t)}{\rho_{k0}},$$

$$q_3(t) = q_{30} \cdot \frac{\rho_k(t)}{\rho_{k0}},$$

где  $q_{30}$ ,  $f_{30}$ ,  $\rho_{k0}$  – начальные значения параметров.

Полученные зависимости могут использоваться для оценки интенсивности набора прочности укрепленным массивом в аналогичных условиях при ведении горно-строительных работ, укреплении грунтовых оснований сооружений и зданий инъекцией цементных растворов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Простов, С. М. Геоэлектрический контроль зон укрепления глинистых горных пород / С. М. Простов, В. А. Хямляйнен, М. В. Гуцал, С. П. Бахаева; РАЕН. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. – 127 с.

2. Простов, С. М. Комплексный контроль качества укрепления неустойчивых грунтов инъекционными растворами / С. М. Простов, О. В. Герасимов, М. В. Гуцал // Вестник ТГАСУ. – 2003. – №1. – С. 231–237.

3. Простов, С. М. Комплексный геоконтроль процессов инъекционного укрепления влагонасыщенных грунтов/ С. М. Простов, О. В. Герасимов, Е. А. Мальцев // Вестник КузГТУ. – 2003. – №3. – С. 17–20.

4. Простов, С. М. Электрофизический контроль при нагнетании цементного раствора в неустойчивые грунты / С. М. Простов, М. В. Гуцал, О. В. Герасимов // Труды Междунар. геотехнического симпозиума "Фундаментостроение в сложных инженерно–геологических условиях". – С-П, 2003. – С. 208–211.

□ Авторы статьи:

Герасимов  
Олег Васильевич  
– заместитель директора по  
науке ОАО "НОЦЕНТР-Д"

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

Пахомов  
Дмитрий Юрьевич  
– студент гр. ФП-001

**УДК 532.529.5**

**Д.Ю. Палеев, В.В. Вашилов**

## ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ПОТОКА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ПОД ВЛИЯНИЕМ РАБОТЫ ВЕНТИЛЯТОРА

Искусственная тяга, создаваемая вентиляторами главного проветривания, всегда накладывается на естественную тягу воздуха, возникающую за счёт изменения физических параметров воздуха при прохождении его через сеть горных выработок. Вектор естественной тяги может как совпадать с направлением движения вентиляционной струи, так и быть противоположно направленным, препятствуя работе вентиляторов. Расчёт результирующей тяги осуществляется различными аналитическими и численными методами, в основе которых лежит использование осреднённых характеристик вентиляционного потока [1, 2]. Так, де-прессия естественной тяги обычно определяется как разность аэростатических давлений воздуха в воздухоподающем и воздуховыдающем стволах. Такие расчёты легко проверяются

практическими замерами в ходе депрессионных съёмок, а их точность удовлетворяет в большинстве случаев инженерные службы шахты. Однако методы, основанные на упрощающих положениях, не всегда позволяют выявить и правильно описать физические процессы, происходящие при движении воздуха в пределах отдельной выработки. Более точными являются методы, основанные на численном решении дифференциальных уравнений газовой динамики.

Рассмотрим случай, когда два шахтных ствола одинаковой глубины 1000 м сбиты между собой горизонтальной выработкой 4 длиной 3000 м (рис. 1). Площадь поперечного сечения выработок 16 м<sup>2</sup>, аэродинамическое сопротивление - 0,0098 кп. Верхняя часть ствола 2 изолирована от атмосферы. Канал 1 длиной 10 м с установленным в нём вентилятором имеет аэродинамическое сопротивление 0,0976 кп. Вентилятор работает на нагнетание с производительностью 3360 м<sup>3</sup>/мин. Атмосферное давление в устье ствола 5 равно 0,101 МПа. Предполагается, что при неработающем вентиляторе температура воздуха и стенок выработок одинакова и естественная тяга шахты равна нулю.

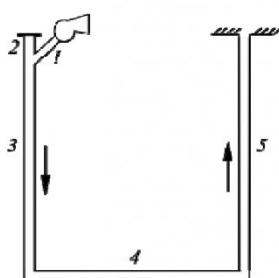


Рис. 1. Схема к расчёту

Для расчёта вентиляционной сети, изображённой на рис. 1, воспользуемся следующими газодинамическими уравнениями, в которых учитывается тепловое расширение потока, влияние аэростатического давления, трение и конвективный теплообмен газа со стенками:

$$\frac{\partial \rho s}{\partial t} + \frac{\partial \rho s u}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho s u}{\partial t} + \frac{\partial \rho s u^2}{\partial x} + s \frac{\partial P}{\partial x} = \quad (2)$$

$$= -\Pi C_r \frac{\rho u^2}{2} - s \rho g \sin \alpha,$$

$$\frac{\partial \rho s}{\partial t} \left( c_v T + \frac{u^2}{2} \right) + \frac{\partial \rho s u}{\partial x} \left( c_v T + \frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) = \\ = \Pi \alpha_T (T - T_{CT}) - s \rho u g \sin \alpha, \quad (3)$$

$$P = \rho R T, \quad (4)$$

где  $\rho$  - плотность;  $u$  - скорость;  $P$  - давление;  $T$  - температура потока;  $T_{ct}$  - температура стенок выработок;  $\alpha_T$  - коэффициент теплоотдачи;  $C_r$  - коэффициент трения потока о стенки;  $c_v$  - теплоёмкость потока при постоянном объёме;  $s$ ,  $\Pi$  – сечение и периметр выработки;  $x$  - координата вдоль выработки;  $g$  – ускорение свободного падения;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $\alpha$  – угол наклона выработки к горизонту;  $t$  – время.