

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А.Н., Немировский Ю.В. Многослойные анизотропные оболочки и пластины. - Новосибирск: Наука, 2001. 288 с.
2. Богданович А.Е. Нелинейные задачи динамики цилиндрических композитных оболочек. -Рига: Зинатне, 1987. 295 с.
3. Гольденвейзер А.Л., Лидский В.Б., Товстик П.Е. Свободные колебания тонких упругих оболочек. -М.: Наука, 1979. 383 с.
4. Смирнов В.И. Курс высшей математики. -М.: Наука, 1974. Т.4. Ч.1,2. 880 с.
5. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. -М.: Наука, 1966. 635 с.
6. Смирнов В.И. Курс высшей математики. -М.: Наука, 1974. Т.2. 655 с.
7. Михлин С.Г. Лекции по линейным интегральным уравнениям. -М.: Наука, 1959. 655 с.
8. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. -М.: Наука, 1970. 512 с.
9. Самарский А.А. Теория разностных схем. -М.: Наука, 1977. 656 с.
10. Канторович Л.В., Акилов Г.П. Функциональный анализ. -М.: Наука, 1984. 752 с.
11. Смирнов В.И. Курс высшей математики. -М.: Наука, 1974. Т.1. 480 с.
12. Уилкинсон Дж. Алгебраическая проблема собственных значений. -М.: Наука, 1970.
13. Смирнов В.И. Курс высшей математики. -М.: Наука, 1974. Т.3. Ч.2. 672 с.

□ Автор статьи:

Петрушева  
Ирина Ивановна  
- старший преподаватель каф. при-  
кладной математики

УДК 624.131.5: 550.372

С.М. Простов, О.В. Герасимов, Е.А. Мальцев

### КОМПЛЕКСНЫЙ ГЕОКОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ ИНЪЕКЦИОННОГО УКРЕПЛЕНИЯ ВЛАГОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ

Опытно-промышленные испытания комплексного метода геоконтроля гидродинамических и геомеханических процессов в закрепляемых грунтах проведены на площадке строящейся базы служебного автотранспорта ОВО (г. Кемерово, ул. Железнодорожная). Исследование физико-механических свойств грунтов, проектирование и устройство фундаментов здания базы в обводненных неустойчивых грунтах с изготовлением буринъекционных свай методом фиксировано-высоконапорной цементации по технологии ООО "НООЦЕНТР –Д" проведены в 2002 – 2003 гг.

Методической основой комплексного геоэлектрического контроля являются экспериментально установленные в [1] диапазоны изменения удельного электросопротивления глинистых грунтов при их насыщении природными и закрепляющими растворами разной концентрации в широком диапазоне частот и твердении грунтовых образцов.

Согласно инженерно-геологическим изысканиям, прорезаемые буринъекционными сваями геологические слои представлены почвой с включением строительного и бытового мусора, суглинками легкими высокопористыми от бурых до серых, суглинками тяжелыми серыми высокопористыми. Наличие подстилающего слоя тяжелых суг-

линков способствовало образованию безнапорного горизонта грунтовых вод на глубине 0,3-1,0 м от земной поверхности и заболачиванию местности, что потребовало применения специальной технологии выполнения фундаментов с укреплением.

Технология закрепления состояла в следующем. На участке изготовления буринъекционных свай пробурены лидерные скважины на глубину 0,6-0,7 м, через которые задавливались перфорированные иньекторы на глубину 5,5 м. В устьевой части иньекторов на глубину 0,5 м выполнен тампонаж затрубного пространства раствором на расширяющемся цементе. После монтажа иньекторов производились работы по устройству железобетонного ростверка, а затем осуществлось очередное нагнетание в иньекторы цементно-песчаного раствора.

Раствор имел следующий состав (на 1 м<sup>3</sup>): песок мелкий с примесью глинистых частиц до 2% и пылеватых частиц до 20% - 1150 кг; портландцемент М400-750 кг; вода - 450 л; специальные патентованные добавки; контрастная соль NaCl - 5 кг.

Давление нагнетания поддерживали постоянным  $P = 0,8-1$  МПа по зажимной схеме, время на-

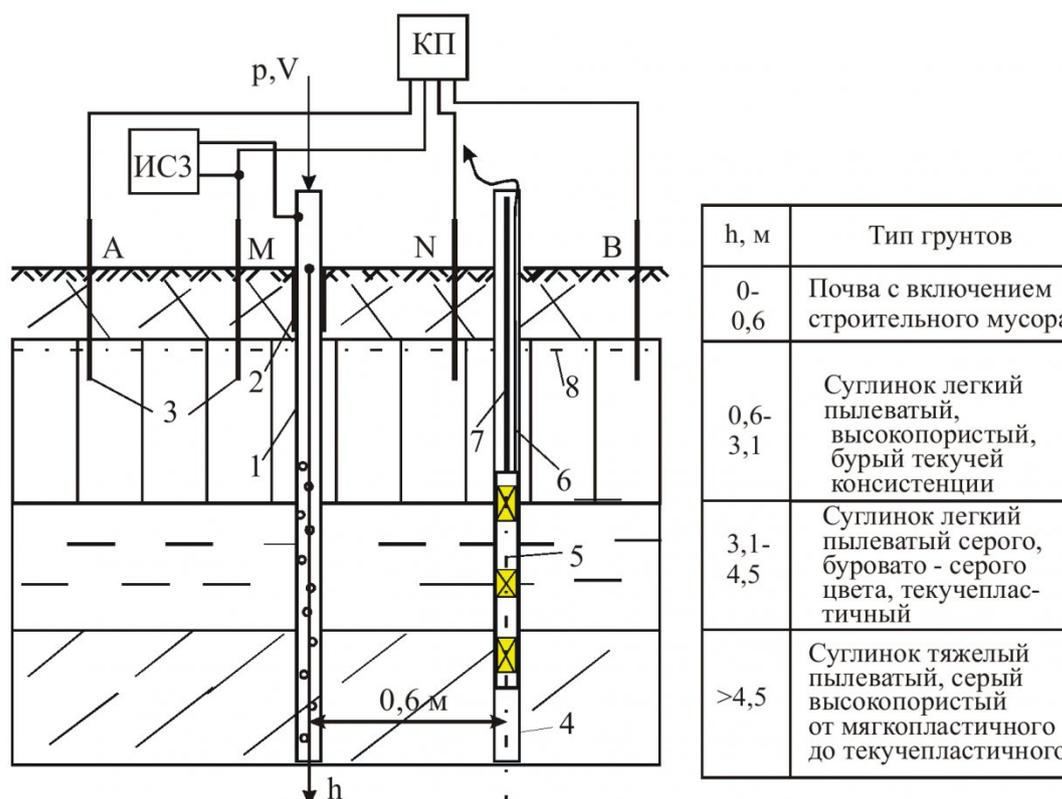


Рис. 1. Схема контролируемого закрепления обводненных грунтов методом высоконапорной инъекции:

- 1 - иньектор; 2 - тампон на расширяющемся цементе; 3 - электроды-иньекторы; 4 - контрольная скважина; 5 - индукционный датчик; 6 - соединительный кабель датчика; 7 - досылочные штанги; 8 - уровень грунтовых вод; КП - каротажный прибор; ИСЗ - измеритель сопротивления заземления

гнетания составляло 10-20 мин, при этом расход раствора не превышал  $V = 1 \text{ м}^3$  на один иньектор.

Для контроля геомеханических и гидродинамических процессов в закрепляемом обводненном грунтовом массиве были проведены комплексные геоэлектрические исследования следующими методами: эффективных электросопротивлений по схеме вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ,  $AM = MN = NB$ ,  $AB < 15 \text{ м}$ ); электросопротивлений заземлителя-иньектора по 2-электродной схеме опытным прибором ИСЗ-1 на частоте  $f = 500 \text{ Гц}$ ; скважинного индукционного каротажа (ИК). Схемы, конструкции и технические характеристики приборов приведены в [2]. Способы контролируемого инъекционного упрочнения грунтового массива защищены патентами РФ [3,4].

Схема установки с геологическими данными о строении грунтового массива представлена на рис. 1. Контрольная скважина была пробурена на расстоянии 0,6 м от иньектора и армирована толстостенной полиэтиленовой трубой 4 с внутренним диаметром 150 мм, герметизированной с нижнего торца. Индукционный датчик 5 перемещали по скважине досылочными штангами 7, сигнал с датчика, переданный по соединительному кабелю 6, измеряли прибором КП-2 в режиме милливольтметра. Измерения по схемам ВЭЗ и ИСЗ проводи-

ли с помощью штыревых забивных электродов 3.

Для контроля изменения физико-механических свойств грунтов по глубине массива силами ООО "НООЦЕНТР-Д" были проведены полевые испытания методом статического зондирования (ГОСТ 19912-2001), включающие вдавливание в грунт зонда и поинтервальное измерение удельного сопротивления грунта под наконечником зонда  $q_3$  и на участке боковой поверхности (муфте трения) зонда  $f_3$ .

Результаты статического зондирования на экспериментальном участке приведены на рис. 2. Из графиков  $q_3(h)$  и  $f_3(h)$  следует, что слои наименее прочных грунтов расположены на интервалах  $h = 2-4,25 \text{ м}$  и  $h = 6-8 \text{ м}$ , а наиболее прочных – на интервале  $h = 4,5-6 \text{ м}$  (тугопластичные суглинки).

Таким образом, физико-механические свойства грунтового массива распределены весьма неравномерно.

Поскольку механические и гидродинамические процессы при высоконапорном нагнетании цементно-песчаных растворов в слабопроницаемые грунты практически не изучены, задачами экспериментально-производственных испытаний были следующие.

1. Проверка функциональных возможностей опытной аппаратуры, сопоставление результатов геоэлектрических измерений с геологическими

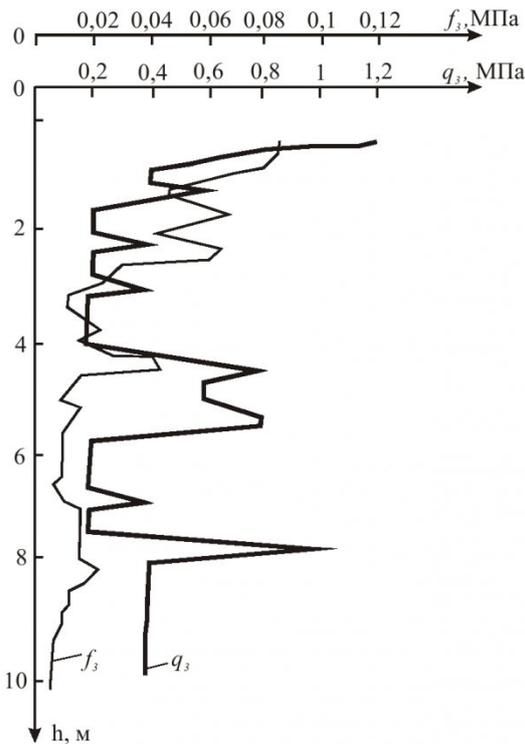


Рис. 2. Изменение прочностных параметров  $q_3$  и  $f_3$  грунтов по глубине  $h$  по результатам статического зондирования

данными и механическими свойствами грунтов.

2. Установление особенностей распространения цементно – песчаного раствора в неоднородном массиве и выработка рекомендаций по совершенствованию технологии укрепления неустойчивого обводненного массива.

На рис. 3 приведен график изменения тока заземлителя-иньектора, интегрально характеризующий динамику контролируемых процессов: в начальной фазе нагнетания ( $t = 0-5$  мин) происходит резкое уменьшение тока  $I$ , которое связано с образованием полостей в наиболее слабом слое за счет отжима поверхностного слоя и местных гидроразрывов; после стабилизации ( $t = 5-9$  мин) начинается интенсивное заполнение образовавшихся полостей ( $t = 9-18$  мин) до момента отказа в приеме раствора скважиной. Таким образом, в процессе инъекции произошли существенные изменения

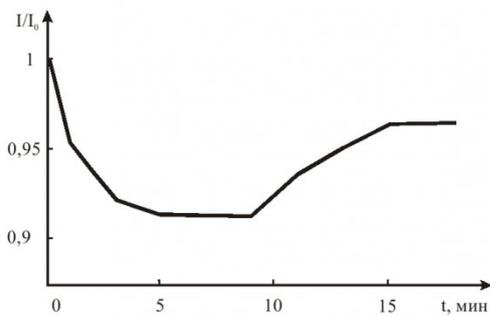


Рис. 3. Изменение тока заземлителя-иньектора в процессе нагнетания раствора (2-электродный метод ИСЗ)

геоэлектрической структуры массива.

Измерения методами ВЭЗ и ИК проводили в 3 этапа: непосредственно перед закачкой, непосредственно после нее и через 10 суток после закачки.

Графики изменения параметров  $\rho_k$  (метод ВЭЗ) и  $E$  (метод ИК) приведены на рис. 4. Анализ графиков показывает, что прослеживается общая закономерность, обусловленная тарировочной лабораторной зависимостью аппаратуры ИК: параметры  $E$  и  $\rho_k$  связаны гиперболической зависимостью. Вместе с тем, имеются существенные отклонения в характере графиков  $\rho_k$  (АВ) и  $E(h)$ , связанные с различиями в физических основах методов ВЭЗ и ИК, а также их различной контролируемой базой (рис. 4).

Для геомеханической интерпретации результатов геоконтроля были построены графики относительного изменения параметров, характеризующие динамику контролируемых процессов на стадиях нагнетания и набора прочности массивом (рис. 5):

$$\begin{aligned} \rho_{k1}/\rho_{k0}(AB); E_1/E_0(h) & - \text{стадии нагнетания;} \\ \rho_{k2}/\rho_{k1}(AB); E_2/E_1(h) & - \text{для стадии твердения.} \end{aligned}$$

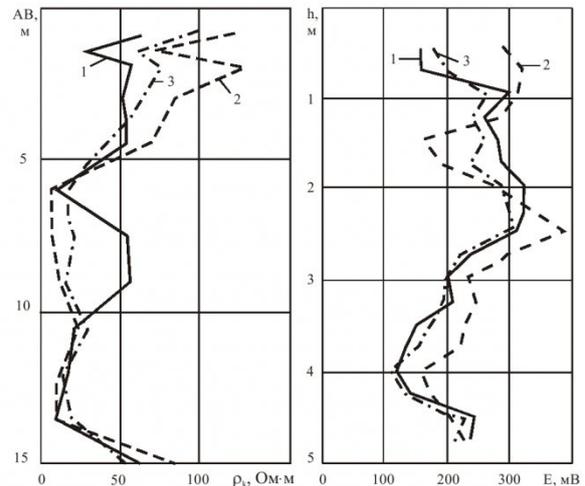


Рис. 4. Результаты геоконтроля нагнетания и твердения цементно – песчаного раствора методами ВЭЗ (а) и ИК (б): 1 - до нагнетания (момент  $t_0$ ); 2 - после нагнетания ( $t_1$ ); 3 - через 10 дней после нагнетания ( $t_2$ )

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  $h=1,25-1,75$  м под действием инъекционного давления (данному интервалу соответствуют отрицательная аномалия  $E$  и положительная  $\rho_k$ , графики 1 на рис. 5);

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

тельная аномалия  $E$  и отрицательная  $\rho_k$ ), что свидетельствует о положительном эффекте обработки массива, заключающемся в закреплении наименее прочного участка, определяющего в це-

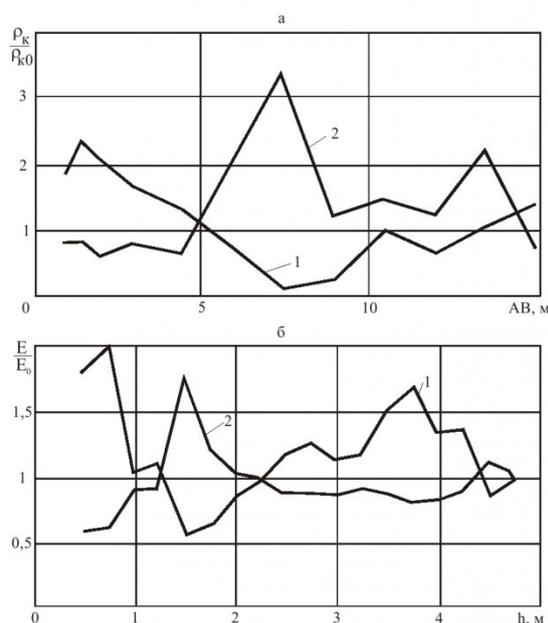


Рис. 5. Графики относительного изменения параметров  $\rho_k$  (а) и  $E$  (б) на разных стадиях закрепления: 1-нагнетание ( $t_0-t_1$ ); 2-твердение и набор прочности ( $t_1-t_2$ )

лом несущую способность основания фундамента;

- на участке, прилегающем к тампону ( $h = 0,5-1$  м), произошел прорыв раствора с выходом на поверхность в объеме 20-30 л (на данном интервале приращение  $E > 0$ ), зона прорыва не распространяется в глубину массива, т. к. на графике 1  $\rho_k$  (AB) отрицательных аномалий не обнаружено;

- в результате твердения раствора произошло заполнение пустот цементно – песчаным раствором, сопровождающееся вытеснением природной жидкости на интервале  $h = 2,25-4,25$  м (отрица-

тельные аномалии  $E$  и положительные  $\rho_k$  на графиках 2 рис. 5);

- на интервале  $h = 1,25-2$  м произошло частичное заполнение увеличившегося при нагнетании объема пустот, остаточные пустоты оказались заполненными природной влагой (положительная аномалия  $E$  и отрицательная  $\rho_k$  на графиках 2);

- в приповерхностном слое выше уровня грунтовых вод ( $h = 0,5-0,75$  м) наблюдается восстановление прежнего объема пустот из-за оседания грунта (отрицательная аномалия  $E$  на графике 2).

Данные повторного статического зондирования, приуроченного к последней серии измерений, показало увеличение прочностных параметров грунтового массива в среднем в 1,7 раза, что свидетельствует об эффективности применяемой технологии в сложных инженерно-геологических условиях строящегося объекта.

Результаты комплексных исследований позволили установить, что одним из резервов повышения эффективности технологии высоконапорной цементации грунтов является регулирование отжима поверхностного слоя массива. Это может быть осуществлено, например, установкой на земную поверхность упора, жестко соединенного с анкером-инъектором. При этом площадь данного упора и величина зазора с земной поверхностью могут быть определены расчетным путем, исходя из начальной пористости грунтов и инъекционного давления, или опытно-экспериментальным.

Подтверждена эффективность применения метода ИК для исследования состояния массивов влагонасыщенных несвязанных грунтов со сложной геологической структурой. Данный метод является практически единственным, обеспечивающим многократный электромагнитный короткаж в обсаженных контрольных скважинах, оборудованных в текучепластичных грунтах и плывунах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Простов С.М. Электросопротивление влагонасыщенных грунтов и пород при инъекционном укреплении / С.М. Простов, М.В. Гуцал // Вестн. КузГТУ. - 2000. - №4. - С. 59-61.
2. Хямяляйнен В.А. Геоэлектрический контроль разрушения и инъекционного упрочнения горных пород / В.А. Хямяляйнен, С.М. Простов, П.С. Сыркин. - М.: Недра, 1996. - 288с.
3. Патент № 2175060 С1 (RU), Е 21С 39/00. Способ контроля состояния массива горных пород./ С.М. Простов, В.А. Хямяляйнен, Ю.В. Бурков, Е.А. Мальцев, М.В. Гуцал, Л.П. Понасенко. - № 2000106125/03; Заявл. 13.03.00; Оpubл. 20.10.01; Бюл. № 29.
4. Патент № 2175040 С1 (RU), МКИ 7 Е 02Д 3/11, Е 21С 39/00. Способ электрохимического укрепления горных пород / С.М. Простов, В.А. Хямяляйнен, Ю.В. Бурков, М.В. Гуцал, Е.А. Мальцев, Л.П. Понасенко. - № 2000106128/03; Заявл. 13.03.00; Оpubл. 20.10.01; Бюл. № 29.

□ Авторы статьи:

Простов  
Сергей Михайлович  
- д-р техн. наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики

Герасимов  
Олег Васильевич  
- генеральный директор  
ООО "НООЦЕНТР – Д"

Мальцев  
Евгений Анатольевич  
-аспирант