ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВАА

УДК 624.138.24:624.131.3:550.834

Н.Ю. Никулин, С.М. Простов, В.А. Хямяляйнен, О.В. Герасимов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ ВЫСОКОНАПОРНОЙ ИНЪЕКЦИИ ГРУНТОВ

Одним из существенных технологических параметров при проведении высоконапорной инъекции (ВНИ) ослабленных грунтов является расход закрепляющего раствора[1]. Оптимальный выбор объема раствора важен для повышения экономичности метода, однако при этом качество закрепительных работ должно отвечать установленным требованиям. Для обоснования проектных решений по выбору оптимального расхода закрепляющего раствора проведено экспериментальное закрепление грунтов и исследование геомеханических процессов в зоне ВНИ.

В качестве опытного полигона был выбран участок, расположенный в г. Кемерово на пересечении улиц Тайшетская и Агеева. Инженерно-геологические изыскания проведены ООО «НОЦЕНТР-Д» для разработки проекта закрепления грунтов в основании сооружения. План экспериментального участка представлен на рис. 1.

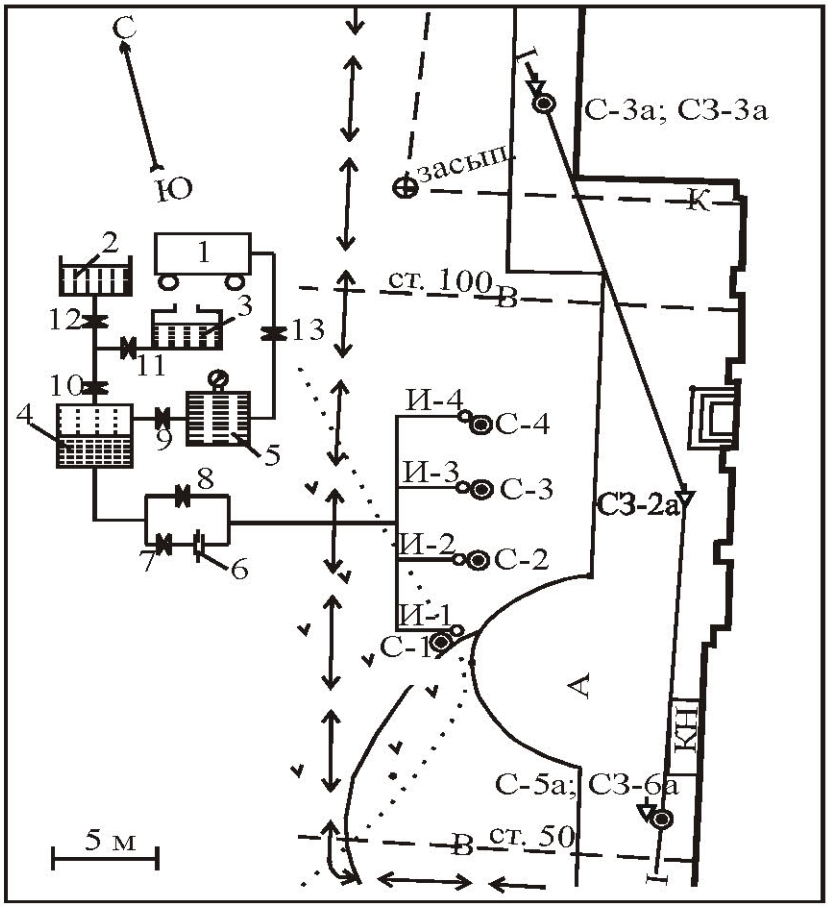

Рис.1. План опытного участка:И-1-4 – инъекторы; С-1-4 – контрольные скважины; С-3а, С-5а – разведочные скважины пробуренные до ВНИ; СЗ-2а, 3а и 6а – точки статического зондирования; I-I – линия геологического разреза, построенного по результатам изысканий до проведения ВНИ; 1 – компрессор; 2 – бак для суспензии; 3 – бак для скрепляющего раствора; 4 – рабочая емкость; 5 –

[1] Работа выполнена в рамках выполнения федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. Соглашение №14.B37.21.0581 от20 августа 2012 г.

Таблица 2. Физико-механические свойства грунтов до ВНИ

№ выработки	Глубина отбора	Природная влажность W, д.е.	Влажность на границе текучести W_L, д.е.	Влажность на границе раскатывания W_p, д.е.	Число пластичности I_p, д.е.	Показатель текучести I_L, д.е.	Плотность частиц грунта P_s, г/см^3	Плотность грунта P, г/см^3	Коэффициент пористости е, д.е.	Модуль деформации E, МПа	Угол внутреннего трения φ, °	Сцепление C, кПа	Относительная просадочность E_{sl}, д.е.
С-3а	2,0	0,24	0,33	0,21	0,12	0,25	2,71	1,78	0,88	2,6			0,011
С-3а	3,0	0,27	0,33	0,23	0,10	0,40	2,70	1,58	1,18	3,3	21	19,0	0,010
С-3а	4,0	0,31	0,36	0,24	0,12	0,58	2,71	1,74	1,04	2,7	17	15,0	0,002
С-3а	6,0	0,27	0,29	0,19	0,10	0,80	2,69	1,89	0,81	1,9	15	16,0	
С-5а	2,0	0,26	0,34	0,22	0,12	0,33	2,71	1,71	0,99	3,7			0,012
С-5а	3,0	0,29	0,32	0,22	0,10	0,70	2,70	1,76	0,99	2,9	15	12,0	
С-5а	4,0	0,32	0,35	0,26	0,09	0,67	2,69	1,72	1,07				0,001
С-5а	6,0	0,29	0,30	0,22	0,08	0,88	2,68	1,87	0,85	1,9	17	12,0	

Вдоль оси инъекторов И-1 – И-4 с шагом 4 м были пробурены лидерные скважины диаметром 100 мм на глубину глухой части инъектора, который конструктивно представляет собой трубу длиной 5 м с перфорацией на интервале 3 м от основания. Далее производилось погружение инъекторов с последующим тампонажем затрубного пространства цементным раствором марки М150. Через сутки после устройства тампона произведено нагнетание песчано-цементного раствора под давлением 0,5–1,5 МПа. Для нагнетания применялся цементно-песчаный раствор М200 со специальными добавками по технологии ООО «НОЦЕНТР-Д». Расход укрепляющего раствора по

Таблица 1. Технологический календарный план контролируемой ВНИ

Операции	Дата												
	до ВНИ	18.06.2012	21.06.2012	22.06.2012	27.06.2012	4.07.2012	5.07.2012	11.07.2012	16.07.2012	24.07.2012	31.07.2012	4.09.2012	7.09.2012
Основные технологические:													
– вдавливание инъектора			■										
– тампонаж					■								
– инъектирование укрепляющего раствора						■							
Геоконтроль:													
– отбор проб грунта с определением физико-механических свойств	■												■
– статическое геомеханическое зондирование	■								■		■		■
– вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ)		■	■		■		■	■	■	■	■	■	
– круговые ВЭЗ					■		■	■	■	■	■	■	
– метод срединных градиентов				■	■		■	■	■	■		■	
– сейсмический контроль		■	■		■		■	■		■		■	
– георадиолокация		■	■		■		■	■	■	■	■	■	

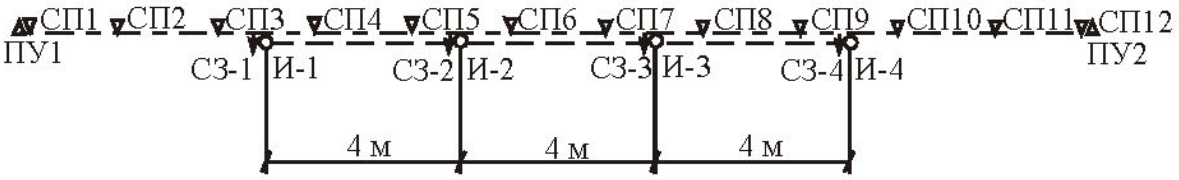

Рис. 2. Схема проведения сейсмических и геомеханических исследований: И-1-4 – инъекторы; ПУ-1-2 – пункт возбуждения сейсмических колебаний; СП-1-12 – геофоны; СЗ-1-4 – точки статического зондирования

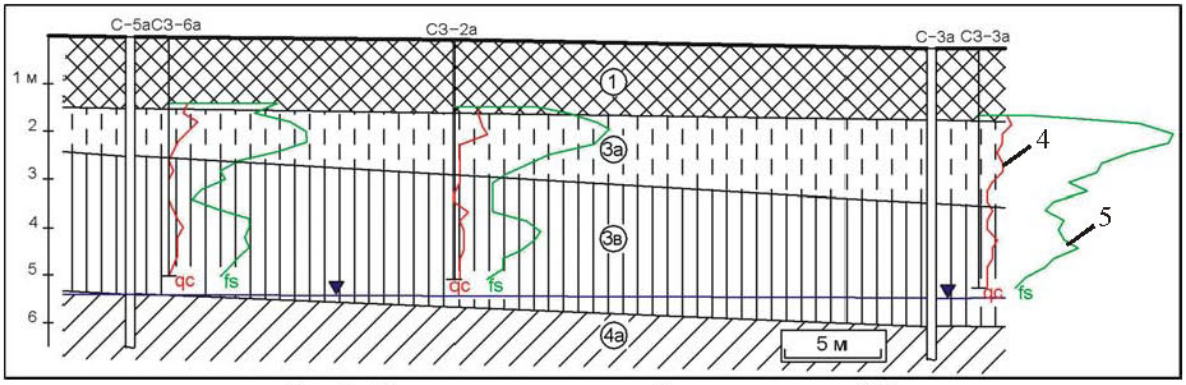

Рис. 3. Инженерно-геологический разрез по линии I–I: 1 – насыпной грунт; 3а – просадочный суглинок; 3в – суглинок мягкопластичной консистенции; 4а – суглинок текучепластичной консистенции; С-5а, С-3а – инженерно-геологические скважины; СЗ-2а, СЗ-3а, СЗ-6а – статическое зондирование; ▼ – уровень грунтовых вод; 4, 5 – графики параметров q_c и f_s статического зондирования

инъекторам был следующим: И-1 – 0,45 м^3; И-2 – 0,35 м^3; И-3 – 0,25 м^3; И-4 – 0,15 м^3.

Каждый этап закрепительных работ сопровождался контрольными измерениями и лабораторными исследованиями характеристик грунтов, в том числе в процессе набора прочности закрепительного раствора. Календарный план проведения основных технологических операций и геоконтроля представлен в табл. 1.

В данной статье рассмотрены результаты исследований геомеханических процессов при ВНИ следующими методами:

– выбуривание образцов закрепленного грунта с последующим лабораторным определением физико-механических свойств;

– статическое (геомеханическое) зондирование;

– сейсмоакустический контроль.

Схема проведения геомеханического и сейсмоакустического контроля приведена на рис. 2,

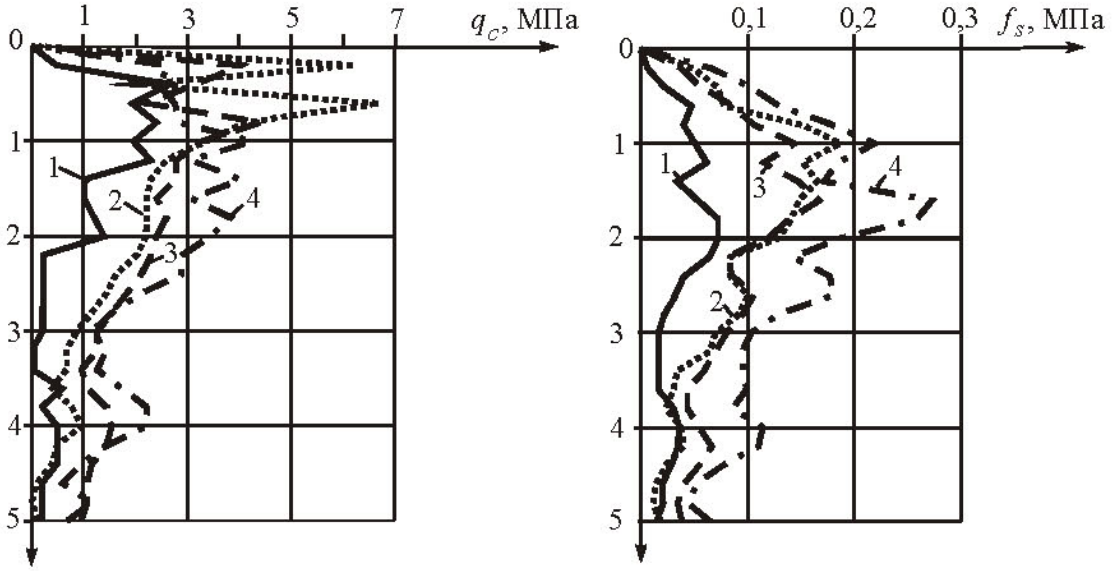

Рис. 4. Изменение удельного сопротивления внедрению конуса q_c (а) и удельного трения по боковой поверхности зонда f_s (б) во времени: 1 – до ВНИ; 2 – 12 сут. после ВНИ; 3 – 27 сут. после ВНИ; 4 – 62 сут. после ВНИ

при этом точки статического зондирования СЗ-1-4 располагались на расстоянии 10–15 см от оси инъектора на всех этапах геоконтроля.

Сейсмоакустические исследования проводились вдоль профиля, лежащего в одной плоскости с инъекторами И-1-4. Установка для проведения сейсмических наблюдений представляла собой равномерное распределение сейсмопремников (геофонов) СП-1-12 вдоль профиля, центральная часть которой совпадала с центром линии инъекторов. Расстояние между геофонами составляло 2 м. Пункты возбуждения упругих колебаний ПУ-1-2 располагались по краям профиля.

Более детально оборудование, использованное для проведения статического зондирования и сейсмоакустического контроля, описано в работах [1, 2].

По данным инженерно-геологических изысканий, предшествующих ВНИ, получены физико-механические свойства грунтов в естественном состоянии (табл. 2), а также построен геологический разрез по профилю I–I (рис. 3). Линия геологического разреза располагалась в 12 м восточнее экспериментального участка.

Верхняя часть разреза сложена насыпным грунтом 1, который представлен смесью суглинка,

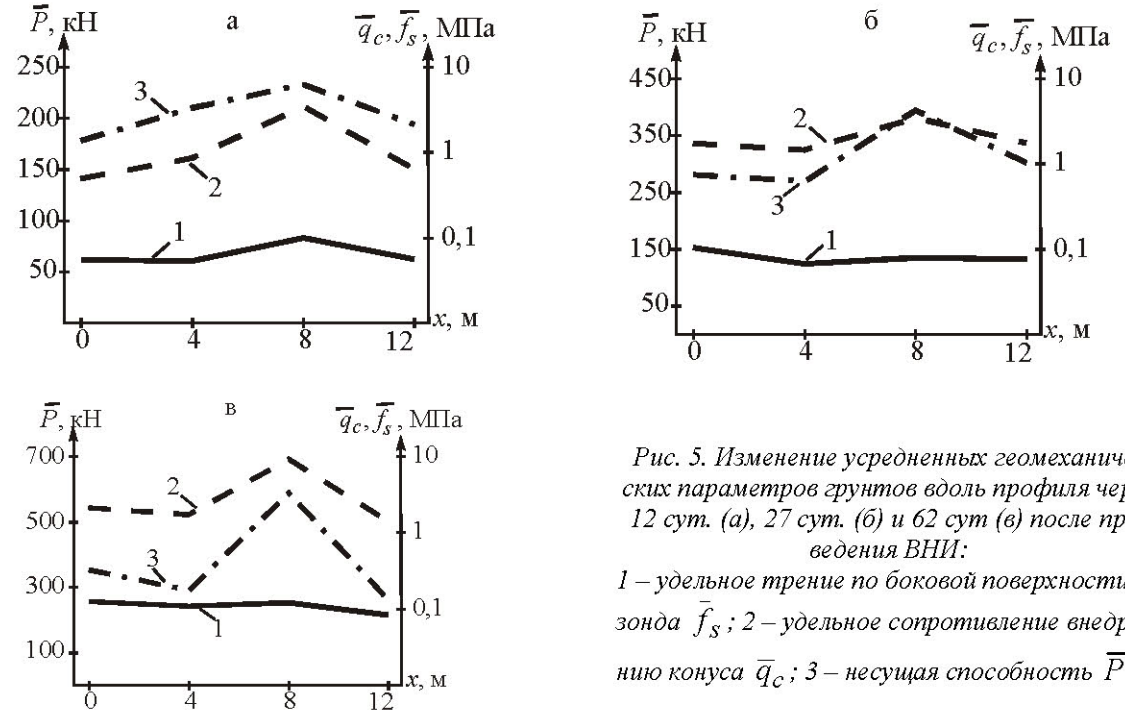

Рис. 5. Изменение усредненных геомеханических параметров грунтов вдоль профиля через 12 сут. (а), 27 сут. (б) и 62 сут (в) после проведения ВНИ:
1 – удельное трение по боковой поверхности зонда $\overline{f}_s$; 2 – удельное сопротивление внедрению конуса $\overline{q}_c$; 3 – несущая способность $\overline{P}$

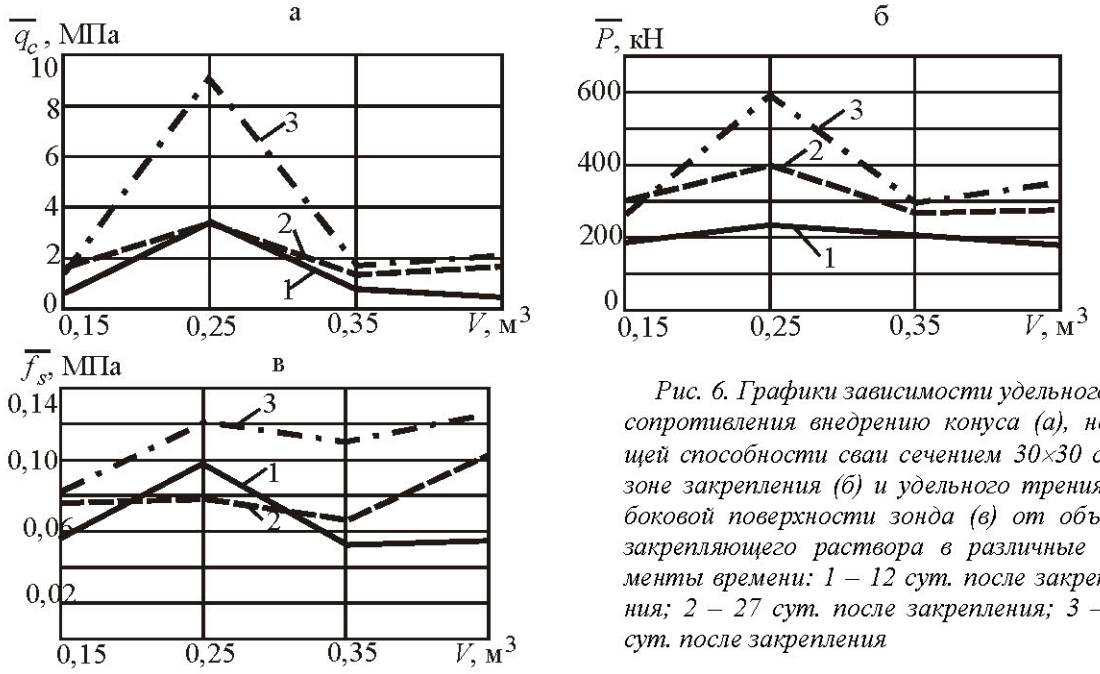

Рис. 6. Графики зависимости удельного сопротивления внедрению конуса (а), несущей способности сваи сечением 30×30 см в зоне закрепления (б) и удельного трения по боковой поверхности зонда (в) от объёма закрепляющего раствора в различные моменты времени: 1 – 12 сут. после закрепления; 2 – 27 сут. после закрепления; 3 – 62 сут. после закрепления

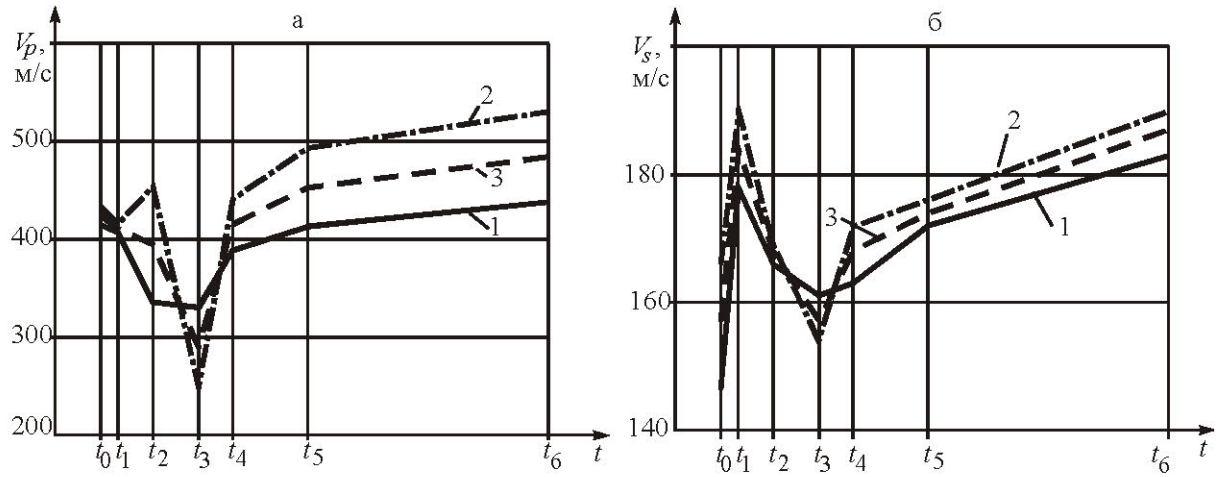

Рис. 7. Изменение скоростей продольных V_p (а) и поперечных V_s волн (б) на различных этапах проведения ВНИ: 1 – скорости, полученные при возбуждении упругих волн в пункте удара 1; 2 – то же в пункте удара 2; 3 – средние значения скоростей

почвы и строительного мусора. Мощность слоя 1,5 м. В подошве слоя залегает суглинок бурый, высокопористый, влажный, твердой и тугопластичной консистенции, просадочный, мощностью 1–1,8 м (слой 3а). Суглинок 3в серовато-бурый, высоко- и низкопористый, мягкопластичной консистенции, непросадочный, распространен в виде пласта под суглинком 3а с глубины 2,5–3,3 м до глубины 5,4–5,8 м. Ниже, под слоем 3в разрез сложен грунтами 4а, которые представлены суглинком серым аллювиальным, мягкопластичной – текучепластичной консистенции. Грунтовые воды зафиксированы на глубине 5,2–5,4 м. Таким образом, в зону закрепления попадают суглинки мягкопластичной и текучепластичной консистенции, а также просадочные грунты I-го типа.

На основании полученных данных статического зондирования построены характерные графики зависимости удельного трения боковой поверхности зонда f_s и удельного сопротивления внедрению конуса q_c от времени (рис. 4).

Анализ графиков в зоне закрепления грунтов на интервале глубин от 2 до 5 м показал:

– максимальное удельное сопротивление внедрению конуса и удельное трение по боковой поверхности было достигнуто на интервале глубин от 2,2 до 2,6 м, т. е. на данном интервале произошло максимальное проникновение закрепляющего раствора в грунтовый массив;

– среднее значение удельного сопротивления внедрению конуса увеличилось за 62 дня после ВНИ в 4,4 раза, а трение по боковой поверхности в 4 раза;

– наибольшее увеличение геомеханических характеристик грунтов было достигнуто за 27 сут. после проведения ВНИ, т. к. 100 %-й набор марочной прочности песчанно-цементным раствором достигается за 28 сут.

По данным статического зондирования рассчитана несущая способность P стандартной сваи сечением 30×30 см и длиной 5 м. Методика расчета несущей способности сваи описана в работе [3], данная характеристика грунтов является одной из важнейших, определяющих качество укрепления методом ВНИ. Для прослеживания изменения геомеханических характеристик грунтов в про-

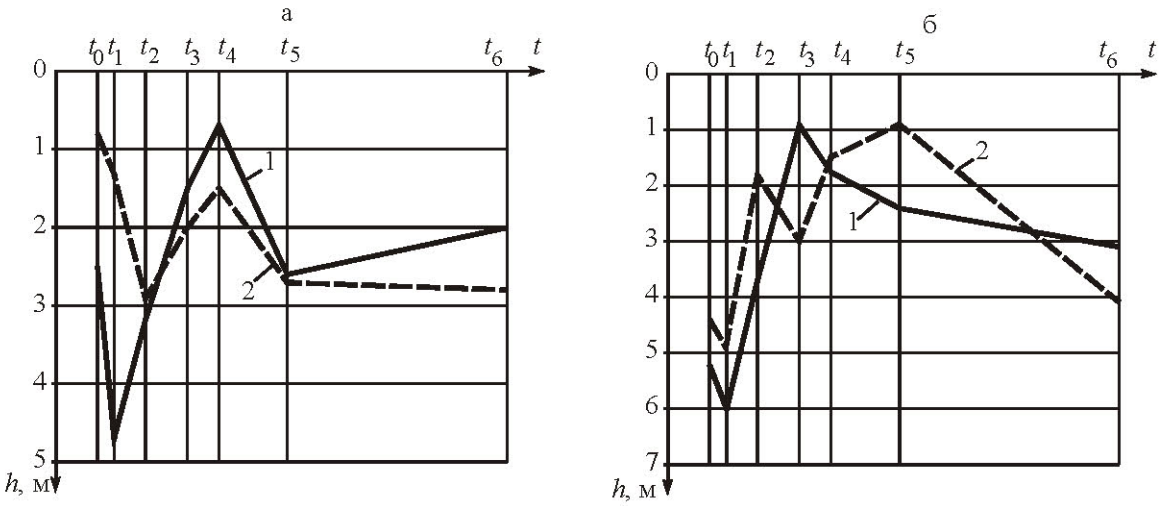

Рис.8. Изменение глубины залегания границы отражения поперечных волн (а) и продольных волн (б) на различных этапах процесса ВНИ: 1 – при возбуждении упругих волн в пункте удара 1; 2 – то же в пункте удара 2

странстве построены графики (рис. 5), которые отображают изменение усредненных значений параметров $\overline{q_c}$, $\overline{f_s}$ и $\overline{P}$ вдоль профиля И-1 – И-4 на разных стадиях упрочнения грунта.

Из анализа полученных графиков следует, что наибольшее упрочнение грунтов произошло на участке в районе инъектора И-3 (V = 0,25 м^3), а параметр f_s изменяется относительно равномерно по всему профилю на протяжении процесса набора прочности массивом.

Для оценки влияния расхода V закрепляющего раствора на изменение усредненных параметров $\overline{q_c}$, $\overline{f_s}$ и $\overline{P}$ на рис. 6 приведены зависимости, из которых следует, что наилучший результат по упрочнению грунтов был достигнут при нагнетании цементно-песчанного раствора в объеме 0,25 м^3. Несущая способность сваи $\overline{P}$ на данном участке увеличилась в 2,6 раза, тогда как в среднем по профилю увеличение несущей способности сваи составило в 1,7 раза (100–170 кН). Изменение параметра q_c повторяет закономерность изменения P, изменение f_s в наибольшем диапазоне наблюдалось при нагнетании раствора с максимальным объемом 0,45 м^3.

Параллельно геомеханическому контролю проведены сейсмоакустические исследования грунтов согласно планограмме работ (табл. 1).

В камеральных условиях в соответствии с методикой, изложенной в [4], проведена корреляция продольных и поперечных волн, определены моменты их первых вступлений, построены годографы преломленных волн, выполнена обработка на ЭВМ способом средних скоростей.

По результатам обработки сейсмоакустических данных получены средние скорости распространения продольных V_p и поперечных V_s волн через закрепленный массив (рис. 7).

После нагнетания раствора происходит резкое скачкообразное снижение скоростей распространения, что связано с разрывом связей в массиве на молекулярном уровне после ВНИ. На следующем этапе твердения раствора в течение первой недели после ВНИ произошло восстановление скоростей V_p до первоначальных значений, однако скорость поперечных волн V_s не восстановилась полностью. Далее графики изменения скоростей упругих волн V_p и V_s выполаживаются и приобретают монотонный характер в сторону увеличения, что говорит о том, что процесс набора прочности бетонным раствором не окончен и продолжается на протяжении 62 сут. после ВНИ.

По результатам сейсмоакустических исследований была рассчитана глубина h залегания границы преломления продольных и поперечных сейсмических волн, эта зависимость от времени на разных этапах ВНИ приведена на рис. 8.

В результате анализа полученных графиков установлено следующее: глубина залегания отражающей границы, рассчитанная по поперечным волнам, уменьшается с 4,6 м до 0,7 м в период до 1-ой недели после ВНИ, далее на последующих этапах ВНИ происходит увеличение глубины залегания отражающего горизонта до 2,5 м, аналогичная картина прослеживается для глубин, рассчитанных по продольным волнам.

Согласно рекомендациям [4] был проведен расчет модуля Юнга E и коэффициента Пуассона μ по формулам:

$$E = \rho V_s^2 \frac{3(V_p/V_s)^2 - 4}{(V_p/V_s)^2 - 1}; \quad \mu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2\left[(V_p/V_s)^2 - 1\right]},$$

где ρ – объемный вес грунта, по данным лабораторных измерений ρ = 1,76 г/см^3.

По полученным данным построена зависимость изменения E и μ во времени (рис. 9), которая качественно повторяет зависимости изменения скоростей распространения упругих волн.

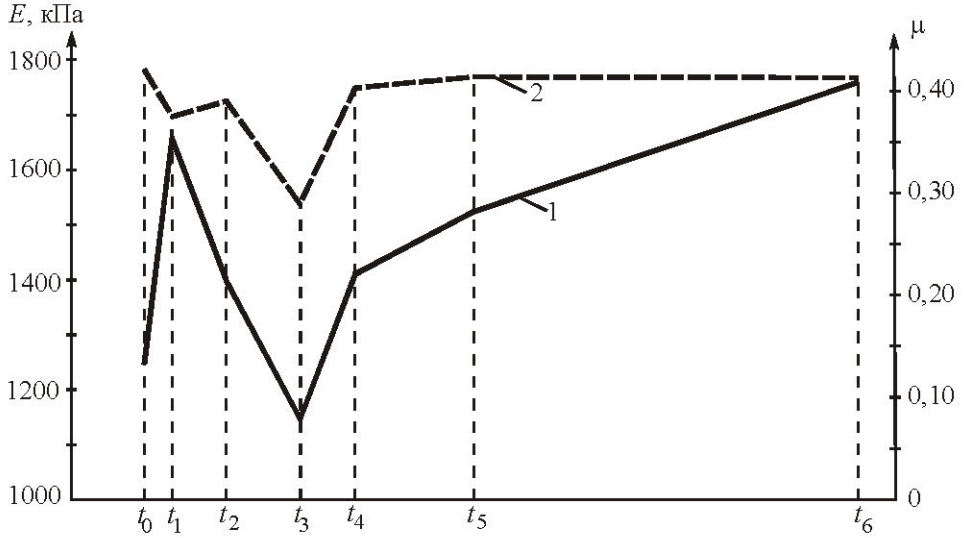

Рис. 9. Изменение расчетных деформационных свойств массива на разных стадиях процесса закрепления грунтов: 1 – модуль Юнга E; 2 – коэффициент Пуассона μ

Таблица 3. Физико-механические свойства грунтов после ВНИ

№ выработки	Глубина отбора	Природная влажность W, д.е.	Влажность на границе текучести W_L, д.е.	Влажность на границе раскатывания W_p, д.е.	Число пластичности I_p, д.е.	Показатель текучести I_L, д.е.	Плотность частиц грунта P_s, г/см^3	Плотность грунта P, г/см^3	Коэффициент пористости e, д.е.	Модуль деформации E, МПа	Угол внутреннего трения φ, °	Сцепление C, кПа	Относительная просадочность E_{sl}, д.е.
С-1	2,5	0,19	0,33	0,22	0,11	-0,25	2,70	1,59	1,03	7,8	15	63,0	0,11
С-1	4,5	0,21	0,30	0,19	0,11	0,23	2,70	1,73	0,89	1,9	12	24,0	0,05
С-2	3,0	0,22	0,38	0,27	0,11	–0,39	2,70	1,54	1,14	2,2	15	47,0	0,05
С-2	5,0	0,22	0,32	0,21	0,11	0,13	2,70	1,69	0,94	3,3	16	18,0	0,02
С-3	2,8	0,26	0,41	0,27	0,14	–0,09	2,72	1,78	0,92	6,7	15	61,0	0,03
С-3	4,8	0,24	0,32	0,21	0,11	0,27	2,70	1,77	0,89	2,7	15	16,0	0,00
С-4	2,2	0,18	0,34	0,22	0,12	–0,37	2,70	1,58	1,01	3,7	19	43,0	0,07
С-4	4,5	0,20	0,31	0,20	0,12	0,04	2,70	1,86	0,74	4,6	16	30,0	0,02

На заключительном этапе эксперимента были проведены буровые работы с последующим отбором проб закрепленного грунта и определением их физико-механических свойств в лабораторных условиях. Физико-механические свойства грунтов на последней стадии ВНИ представлены в табл. 3.

Сопоставляя данные из табл. 2 и 3, удалось установить, что после ВНИ достигнуто общее снижение просадочности грунтов E_{sl} и увеличение сцепления C.

Проведенный комплекс геомеханических исследований дает следующие выводы:

– для обоснования проектных решений по выбору оптимального объема закачиваемого раствора следует проводить опытный эксперимент на площадке, приближенной к основному объекту закрепления, с последующим контролем качества ВНИ;

– статическое зондирование грунтов является основным прямым методом контроля геомеханических процессов укрепления грунтов при ВНИ при обосновании оптимальных объемов закачиваемого укрепляющего раствора, а сейсмоакустический метод обеспечивает интегральную оценку деформационных свойств закрепленного грунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Простов, С. М.* Комплексный мониторинг процессов высоконапорной инъекции грунтов / С. М. Простов, В. А. Хямяляйнен, О. В. Герасимов // РАЕН. – Кемерово; М. : Издательское объединение «Российские университеты»: Кузбассвузиздат – АСТШ, 2006. – 94 с.

2. Методические указания по комплексному геологическому, маркшейдерско-геодезическому и геофизическому контролю процессов укрепления оснований горнотехнических сооружений методом высоконапорной инъекции цементно-песчаных растворов / ГУ КузГТУ; ООО «НОЦЕНТР-Д». – Кемерово, 2006. –40 с.

3. *Рыжков, И. Б.* Статическое зондирование грунтов / И. Б. Рыжков, О. Н. Исаев. – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2010. – 496 с.

4. *Бондарев, В. И.* Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей / В. И. Бондарев [и др.]. – М. : 1974. – 142 с.

□ Авторы статьи

Никулин Николай Юрьевич, аспирант КузГТУ, инженер-геофизик ООО «НОЦЕНТР-Д», e-mail: n.y.nikulin@mail.ru

Простов Сергей Михайлович, докт.техн.наук проф. каф. теоретической и горной механики КузГТУ, e-mail psm.kem@mail.ru.

Хямяляйнен Вениамин Анатольевич, докт.техн.наук, проф., зав. каф. теоретической и горной механики КузГТУ, e-mail: vah@kuzstu.ru

Герасимов Олег Васильевич, канд.техн.наук, ген. дир. ООО «НООЦЕНТР-Д», e-mail: administrator@noocentr-d.ru.