

УДК 624.131.5: 624.131.32

О. В. Герасимов, С. М. Простов

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ УКРЕПЛЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ СЕЙСМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Акустические свойства пористых влагонасыщенных грунтов весьма информативны по отношению к процессам, сопровождающим переход пороносыщающей жидкости в твердое состояние. Так, при замораживании водонасыщенных глин величина скорости продольной упругой волны возрастает в 1,3 раза, для суглинков и супесей это увеличение составляет 1,7–2,0, а для песков достигает 8–10 раз. Данная закономерность, в частности, использовалась в метростроении для контроля процессов возведения подпорной стенки путем двухрядного замораживания грунтов на глубину до 18 м [1]. При выщелачивании и тампонаже закарстованных зон на месторождениях калийной соли диапазоны изменения скорости продольных волн составил  $V_p = 1380\ldots2700$  м/с, а коэффициента затухания –  $\alpha_p = 0,05\ldots0,24$  [2].

Параметры акустических колебаний функционально связаны с упругими характеристиками горных пород: модулями упругости  $E$ , сдвига  $G$ , всестороннего сжатия  $K$ , коэффициентом Пуассона  $\mu$  [3]. Песчаноглинистые грунты представляют собой дисперсные многокомпонентные системы. Экспериментальными и теоретическими исследованиями установлено, что физико-механические свойства грунтов в естественных условиях могут с достаточной степенью надежности определяться через соотношения скоростей продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн с помощью статистических зависимостей, общий вид которых приведен в табл. 1. [4] ( $a_1\ldots a_{12}$  – эмпирические постоянные).

Приведенные выше результаты являются физической ос-

новой для количественного контроля и прогнозирования изменения прочностных и упругих свойств упрочненных грунтов. Решение данной задачи весьма актуально, поскольку применение геофизических методов (электромагнитных, радиометрических, акустических, тепловизионных и др.) при геоконтроле процессов инъекционного укрепления грунтов в большинстве случаев ограничивается установлением факта проникновения упрочняющего раствора в поры грунта, определением геометрических параметров зон инъекции, качественной оценкой процессов консолидации массива.

С целью расширения возможностей сейсмического геоконтроля были проведены натурные комплексные исследования при укреплении грунтов основания сооружения методом

ставленные насыпным грунтом из слежавшейся смеси суглинка, почвы, строительного мусора в виде обломков кирпичей, кусков бетона общей мощностью от 1,5 м до 3,2 м. На период изысканий сезонное промерзание составило от 0,5 м до 1,8 м, далее грунт от влажного до водонасыщенного состояния.

**Слой 2 ( $prQ_{ш}$ )** – верхнечетвертичные покровные отложения, представленные суглинками пылеватыми бурого цвета, непросадочными, макропористыми, средней плотности, преимущественно тугопластичной консистенции, интервалами с включением карбонатов, слабо ожелезненными. Мощность слоя 4,9–5,7 м.

**Слой 3 ( $prQ_{ш}$ )** – суглинки пылеватые серовато-бурого цвета, с прослойками и линзами песка, водонасыщенные от мягкопластичной до текучепла-

Таблица 1

Корреляционные зависимости между механическими и акустическими свойствами грунтов

Механический параметр	Уравнение
Модуль деформации	$E_l = a_1 V_p + a_2 V_s + a_3$
Сцепление	$C = a_4 - a_5 V_p / V_s$
Угол внутреннего трения	$\varphi = a_6 - a_7 V_p / V_s ;$ $\varphi = a_8 (\sqrt{V_p / V_s} - a_9)^{-1} + a_{10}$
Объемный вес	$\gamma = a_{11} \sqrt{V_p} + a_{12}$

высоконапорной инъекции. Инженерно-геологические изыскания на объекте проведены ОАО "КузбассТИСИЗ", инъекционное укрепление грунтов и геофизические исследования – ООО "НООЦЕНТР-Д".

Геологическое строение изучаемого массива на глубину исследований представлено сверху вниз.

**Слой 1 ( $tQ_{ш}$ )** – современные техногенные отложения, пред-

стичной консистенции. Мощность слоя от 2,0 м до 6,6 м.

**Слой 4 ( $a_3 Q_{лгш}$ )** – средневерхнечетвертичные отложения, представленные пылеватыми темнобурыми до коричневых суглинками с прослойками и линзами обводненного песка, с включением незначительного количества мелкой гальки, с примесью органических веществ в виде слабой заторфованности и остатков мелких

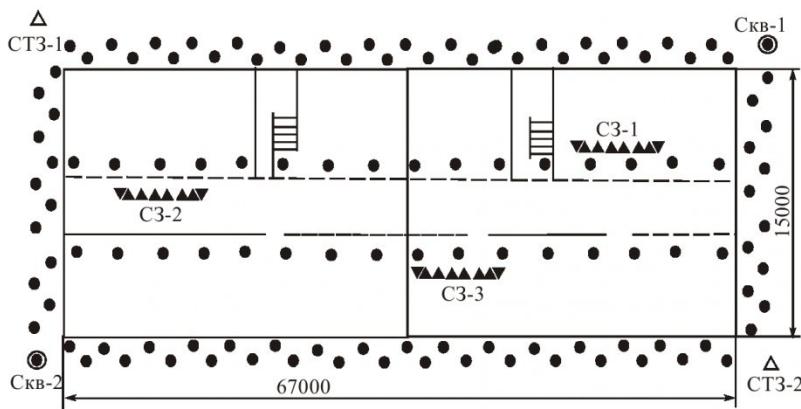


Рис. 1. Схема опытного участка

▼▲▲▲▲▼ — установки сейсмического зондирования С3-1, С3-2, С3-3; ▼ — пункт возбуждения колебаний; ▲ — пункт приема колебаний ПК; ● — инъекторы; ○ — инженерно-геологические скважины Скв-1, Скв-2; Δ — точки статического зондирования СТЗ-1, СТЗ-2

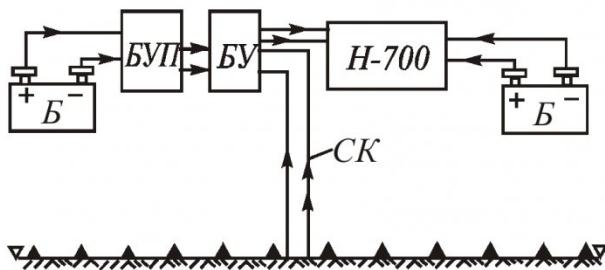


Рис. 2. Схема установки сейсмозондирования с использованием станции "Поиск1-6-12 ACM OB": +Б — аккумуляторы 5-НКН-45; ▲ — пункт приема колебаний ПК, приемники СВ-30; ▽ — пункт возбуждения колебаний; БУ — блок усилителей; Н-700 — светолучевой осциллограф; СК — соединительный кабель

ракушек, сильно ожелезненных, от мягкопластичной до текучепластичной консистенции по лабораторным определениям и

от полутвердой до тугопластичной консистенции по визуальным определениям. Эти суглинки представляют пойменную

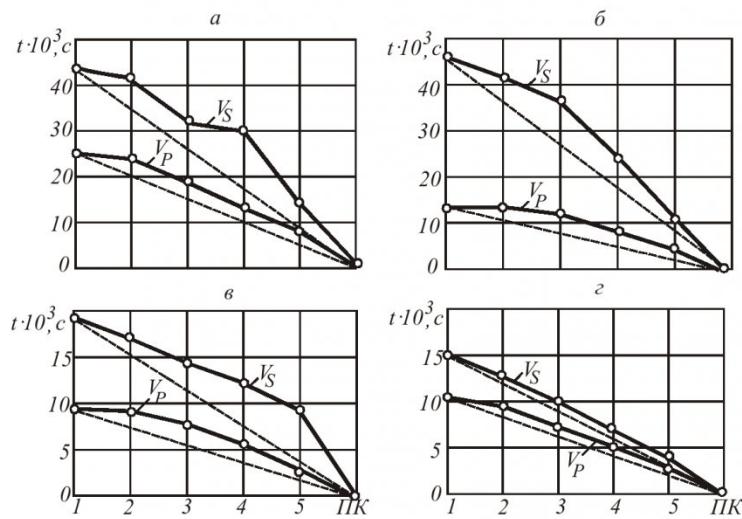


Рис. 3. Годографы продольных  $V_s$  и поперечных  $V_p$  волн на участке ТСЗ-3 до закачки раствора (а), через 2 сут после закачки (б), через 34 сут (в), через 62 сут (г)

фацию аллювиальных отложений третьей надпойменной террасы р. Томь. Вскрыта мощность слоя до 2,6 м.

Гидрогеологические условия площадки характеризуются наличием порового горизонта грунтовых вод в насыпных грунтах слоя 1 и покровных суглинках слоя 3, проявляющегося в виде высокой степени водонасыщения и безнапорного малодебитного горизонта грунтовых вод в суглинках пойменной фации аллювиальных отложений.

Анализ показателей физико-механических характеристик грунтов, представленных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы:

- на момент проектирования и строительства сооружения наличие грунтов меньшей влажности с высокими значениями прочностных и деформационных характеристик позволило применить ленточный фундамент;

- при эксплуатации сооружения происходили неоднократные влагонасыщения основания, что привело к изменению характеристик грунта в сторону их снижения и явилось причиной деформаций фундамента и несущих конструкций.

С целью управления свойствами грунтов неустойчивого основания и предотвращения интенсивных осадок конструкции было проведено укрепление методом высоконапорной инъекции цементно-песчаных растворов. Сущность технологии состоит в закачке цементно-песчаной смеси в массив через инъекторы под давлением 0,6–1,5 МПа. На начальной стадии инъекции происходит отжим и гидрорасчленение глинистых грунтов с образованием искусственных полостей. Затем осуществляется заполнение этих полостей укрепляющей смесью и ее уплотнение [5].

На всех стадиях укрепительных работ проводился контроль состояния и свойств грунтов комплексом методов: опре-

деление свойств отобранных образцов в лабораторных условиях; полевые статические зондирования тензометрическим устройством; геофизический мониторинг. Схема опытного участка приведена на рис. 1.

Сейсморазведка проводилась методом преломленных волн в виде отдельных точек сейсмозондирований (ТСЗ) с получением встречных гидографов и регистрацией скоростей продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн. Измерения проводили сейсмической станцией "Поиск-1-6-12 АСМ ОВ" с использованием 6 и 12 каналов. При регистрации продольных волн применяли сейсмоприемники СВ-30, поперечных – СГ-10, шаг измерений при зондировании составлял 2 м. При регистрации продольных волн сейсмоприемники устанавливали вертикально в ямках глубиной 0,1–0,3 м, возбуждение колебаний осуществляли путем вертикального удара ручным тампнером (кувалдой массой 25 кг) по специальной подставке (система Z-Z). Для повышения эффективности удара в области падения груза снимался верхний рыхлый слой грунта до 0,3 м. Регистрация поперечных волн осуществлялась при ориентации сейсмоприемников и направления удара перпендикулярно профилю (система Y-Y). Поперечные волны возбуждались путем нанесения горизонтально направленного удара по вертикальной стенке специально вырытой ямки глубиной 0,3–0,5 м. Регистрация колебаний производилась с помощью светолучевого осциллографа Н-700 на фотобумагу. Схема установки приведена на рис. 2.

Таблица 2  
Физико-механические свойства грунтов опытного участка

Глубина отбора, м	№ ИГЭ	Гранулометрический состав, %			Природная влажность $W$	Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Коэффициент пористости $e$	Модуль деформации, $E_i$ , МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град
		Песок	Пыль	Глина					
2,0	2				0,25	1,87	0,81	3,3	18
3,0	2	11,5	67,9	20,6	0,30	1,86	0,89		19
4,0	2	12,0	73,3	14,7	0,31	1,90	0,86	3,8	20
5,0	2				0,24	1,96	0,71		
6,0	2				0,24	1,96	0,71	3,4	
3,0	2				0,23	1,94	0,71	5,2	
4,0	2	13,3	70,4	16,3	0,22	1,96	0,68	3,3	21
5,0	2				0,25	1,94	0,74	5,2	19
6,0	2	12,3	72,5	15,2	0,24	1,97	0,69	2,8	
7,0	2				0,24	1,94	0,72		22
7,0	3	14,7	70,6	14,7	0,32	1,94	0,84	2,1	17
8,0	3	18,6	64,6	16,8	0,28	1,96	0,76		17
9,0	3				0,28	1,96	0,76	2,8	
10,0	3	22,9	59,2	17,9	0,27	1,99	0,72		
4,0	3	13,7	70,0	16,3	0,31	1,87	0,88		
5,0	3	17,5	63,5	19,0	0,30	1,86	0,89	2,7	
6,0	3				0,25	1,99	0,70		19
7,0	3				0,26	1,97	0,72	2,9	
8,0	3	18,8	66,0	15,2	0,27	1,98	0,73	3,3	21
9,0	3				0,27	2,03	0,69	3,6	
8,0	3	9,9	74,9	15,2	0,29	1,94	0,79	2,1	20
9,0	3	19,9	64,9	15,2	0,27	2,01	0,70		
11,0	4	17,5	67,3	15,2	0,41	1,82	1,08	2,5	18
12,0	4				0,37	1,83	1,01		
10,0	4				0,37	1,85	0,99	3,4	20
11,0	4	16,6	66,0	17,4	0,30	1,88	0,86		
12,0	4	14,4	67,6	17,9	0,27	1,93	0,77		19
10,0	4	18,8	66,0	15,2	0,28	1,96	0,76	2,2	22
12,0	4	15,5	63,9	20,6	0,29	1,95	0,78		

При обработке экспериментальных данных сначала производили корреляцию (определение времени первых вступлений волн) путем сопоставления формы колебаний), затем были построены гидографы продольных и поперечных волн для серии наблюдений от исходного состояния массива до 62 сут с момента закачки раствора (рис. 3).

Для расчета геосейсмического разреза применяли способ средних скоростей, согласно которому вычисляли кажущиеся скорости преломленных волн  $V_i$

и глубины расположения преломляющих границ  $h_i$ :

$$V_i = \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i}; \quad (1)$$

$$h_i = \frac{t_{0i} V_i V_{i+1}}{2\sqrt{V_{i+1}^2 - V_i^2}}, \quad (2)$$

где  $\Delta x_i$  – интервал гидографа, м;  $\Delta t_i$  – приращение момента времени прихода волны, с;  $t_{0i}$  – ордината касательной на пересечении с осью  $t$  гидографа, с.

Вычисление скоростного разреза проводили по формуле Кондратьева [4]:

Таблица 3

## Физико-механические свойства грунтового массива

Глубина $z$ , м	Плотность грунта в естественном залегании $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$E_d$ , МПа	$V_p/V_s$	$V_s$ , м/с	$E_H$ , МПа
6	1,69	0,70	1,8	420	7,85
4	1,74	0,37	1,55	340	4,75
5	1,76	0,62	1,8	375	6,65
5	1,65	0,50	1,7	385	6,35
4	1,63	0,42	1,5	355	4,65
8	1,66	0,71	1,5	475	8,40
6	1,79	0,50	1,51	360	5,30
4	1,69	0,31	1,52	285	3,05
5	1,71	0,33	1,47	330	4,05
4	1,76	0,42	1,46	370	5,05
5	1,80	0,56	1,55	390	6,35
8	1,75	0,71	1,6	455	8,80

$$V_i(z_i) = x_i \times \sqrt{-0,0072 \eta_i^2 + 0,1574 \eta_i - 0,1446} \quad (3)$$

где  $\eta_i = \frac{V_i t_i}{x_i}$ ,  $x_i$ ,  $z_i$  – координаты.

По результатам сейсмических исследований определяли динамический модуль упругости грунта в натурных условиях

$$E_H = 0,00103 \rho_s^2 \frac{3(V_p/V_s)^2 - 4}{(V_p/V_s)^2 - 1} \quad (4)$$

где  $\rho_s$  – плотность грунта в естественном залегании, т/м<sup>3</sup>.

При обработке использовалась построенная на основе формулы (4) номограмма (рис. 4).

Результаты обработки экспериментальных данных приведены на рис. 5. Из графиков

следует, что при твердении укрепляющей цементной смеси происходит увеличение скорости поперечной волны в диапазоне от  $V_s = 70$ –600 м/с до  $V_s = 700$ –1100 м/с, скорости продольной волны в диапазоне от  $V_p = 500$ –700 м/с до  $V_p = 1400$ –2000 м/с, при этом модуль упругости возрос от начального уровня  $E_H = 0,5$ –3,5 МПа до  $E_H = 13$ –23 МПа.

Зависимости акустических  $V_s$ ,  $V_p$  и деформационного  $E_H$  параметров от времени  $t$  набора прочности близки к линейным, причем на глубине  $h = 3$  м величина  $E_H$  в 2–4 раза выше, чем в поверхностном слое массива ( $h = 1$  м) (рис. 6). При насыщении грунтов укрепляющим раствором происходит резкое увеличение скорости  $V_p$  продольных волн, а скорость  $V_s$  попереч-

речных волн остается практически неизменной, что является признаком попадания раствора в исследуемую зону. Следует

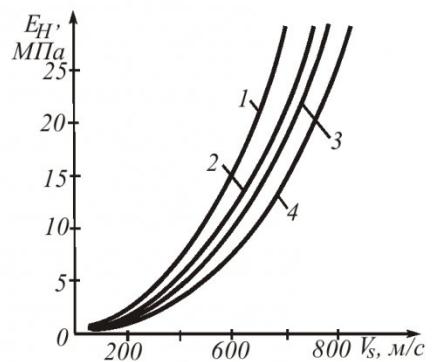


Рис. 4. Номограмма для определения модуля деформации  $E_H$  по результатам сейсмических измерений при  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>: 1 –  $V_p/V_s = 5$ ; 2 – 2; 3 – 1,7; 4 – 1,5

отметить, что величина модуля деформации  $E_H$ , зависящая от

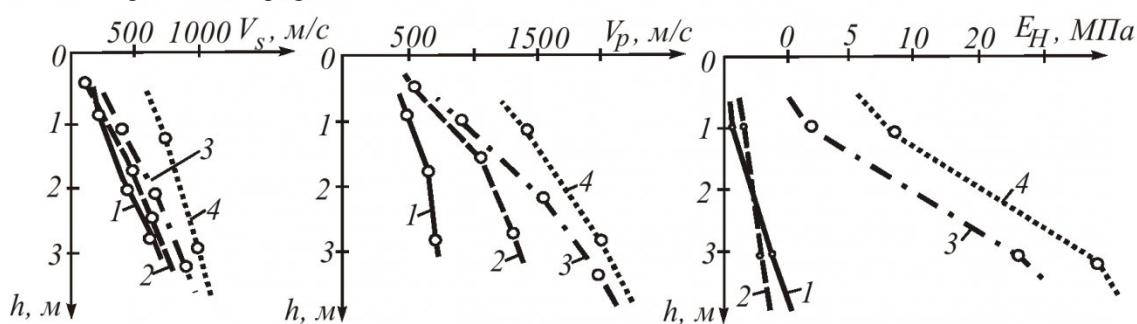


Рис. 5. Графики изменения скорости поперечных  $V_s$  (а), продольных  $V_p$  волн (б) и модуля деформации  $E_H$  по глубине  $h$  массива (в) (точки на графиках  $V_s$  и  $V_p$  соответствуют расчетным глубинам расположения преломляющих границ): 1 – до закачки; 2 – через 2 сут после закачки; 3 – через 34 сут; 4 – через 62 сут

скоростей упругих волн  $V_p$  и  $V_s$ , сразу после закачки раствора уменьшается, а затем, по мере затвердевания раствора увеличивается.

С целью установления взаимосвязи между деформационными параметрами глинистых грунтов, подвергшихся укреплению, была проведена статистическая обработка банка данных, включающего модуль общей деформации  $E_d$ , определенный в лабораторных условиях, и динамический модуль упругости  $E_H$ , рассчитанный по формуле (4) по результатам сейсмических измерений. Исходные данные для анализа

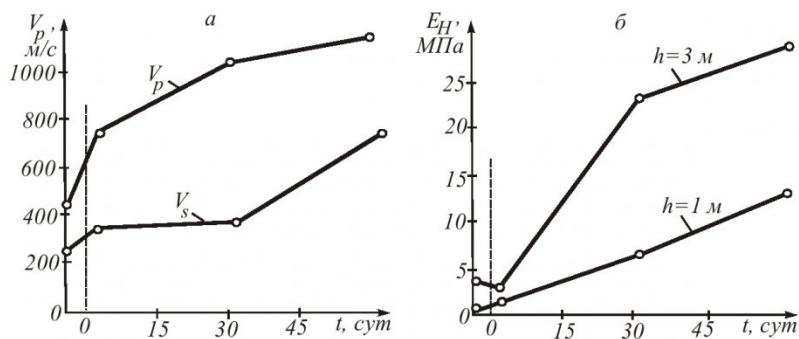


Рис. 6. Графики изменения средних значений скоростей упругих волн  $V_p$  и  $V_s$  (а) и модуля деформации  $E_H$  на различной глубине  $h$  от времени  $t$ , прошедшего с момента закачки

ные зависимости (табл. 4).

Для прогноза деформационных свойств грунтов по данным сейсмических измерений целесообразно использовать линейную зависимость.

Для прогноза деформационных свойств грунтов по данным сейсмических измерений целесообразно использовать линейную зависимость.

Результаты статистической обработки данных

Уравнение	Коэффициент корреляции (корреляционное отношение)	Критерий надежности оценки $t$	Остаточное среднеквадратичное отклонение $\Delta$
$E_d = 0,03498 + 0,08042 E_H$	$r = 0,97216$	13,12	0,03623
$E_d = -0,26583 + 0,44794 \ln E_H$	$R = 0,95693$	10,42	0,04488
$E_d = 0,18976 \exp(0,16069 E_H)$	$R = 0,96002$	10,84	0,04328

приведены в табл. 3.

В результате обработки по программе "Статистика" получены следующие корреляцион-

сообразно использовать линейную зависимость.

Приведенные в работе результаты свидетельствуют об

ней сооружений и прогноза деформационных свойств массива.

Таблица 4

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тютюнник, П. М. Геоакустический контроль состояния пород и качества предварительного тампонажа при сооружении шахтных стволов / П. М. Тютюнник, В. В. Смирнов, В. П. Сбитнев // Шахтное строительство. – 1984. – №2. – С. 20–24.
2. Ермолович, В. В. Геоакустический контроль качества тампонажа закартированных сред // Геоакустические методы контроля и исследования массива горных пород и процессов: Сб. науч. трудов ВИОГЕМ. – Белгород, 1985. – С. 88–94.
3. Гурвич, И. И. Сейсмическая разведка. – М.: Недра, 1970.– 370 с.
4. Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей / ПО "Стройизыскания". – М., 1974. – 142 с.
5. Герасимов, О. В. Применение контролируемой высоконапорной инъекции неустойчивых грунтов в основаниях горнотехнических сооружений в Кузбассе // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Сб. тр. Межд. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2006. – С. 52–57.

□ Авторы статьи:

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

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