

УДК 624.138.24:620.179.17:550.832.4:550.834.04

## ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ СВАЙ И МАССИВОВ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

*Обсуждаются вопросы инструментального контроля с использованием геофизических методов в практике применения струйной цементации грунтов для сооружения подземных геотехнических конструкций. Описаны возможности геофизического комплекса, используемого для обследования состояния объектов, сооружаемых по технологии jet grouting в России и других странах. Экспериментально обосновано применение скважинных сейсмических методов для инструментального контроля качества грунтоцементных свай и массивов.*

### **КАПУСТИН ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ**

Кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, Россия).

### **ЧУРКИН АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ**

Кандидат технических наук, заместитель заведующего лабораторией свайных фундаментов НИИОСП им. Н. М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство» (Москва, Россия).

### **ВЛАДОВ МИХАИЛ ЛЬВОВИЧ**

Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова (Москва, Россия).

### **ЗАСОРИН МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ**

Кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Плутон-Инжиниринг» (Москва, Россия).

### **ШМУРАК ДЕНИС ВАЛЕРЬЕВИЧ**

Аспирант кафедры сейсмометрии и геоакустики, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, Россия).

### **Введение**

Технология устройства грунтоцементных свай (ГЦС) и массивов с применением струйной цементации (jet grouting) широко используется для решения геотехнических задач усиления фундаментов сооружений, укрепления стенок котлованов и дорожного полотна, повышения устойчивости откосов, закрепления грунтовых массивов. Технология предполагает формирование объема грунта с заданными свойствами и определенной геометрией, поэтому проблема контроля качества выполняемых работ является весьма актуальной. Среди методик контроля особое место занимают методы геофизики, так как их использование позволяет получить интегральные характеристики конструкций, оценка которых прямыми методами контроля (экскавацией или извлечением керна) затруднена или невыполнима.

Развитие практики применения геофизических методов для обследования подземных конструкций, созданных с применением струйной цементации, в России и за рубежом шло одновременно. С конца 90-х годов прошлого века на кафедре сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова были разработаны способы применения сейсмического каротажа и межскважинной сейсмической томографии для изучения состояния ГЦС и массивов [1...3], позволяющие получить оценку динамических упругих модулей и геометрических параметров конструкций. Помимо сейсмических методов использовались скважинная георадиолокация [2], методы электротомографии и радиоволновой геоинтроскопии [4]. Наибольшее распространение в отечественной практике получили скважинные сейсмические методы [5].

Специалисты-геотехники в США и Европе в начале XXI века для изучения состояния грунтоцементных колонн и сооружений адаптировали методы акустического каротажа и межскважинных прозвучиваний [6...9]. Проводились полевые и лабораторные исследования для определения возможностей термометрических измерений в теле ГЦС [10], применения наземной и скважинной электротомографии для оценки качества закрепления массива грунтов и геометрических параметров грунтоцементных колонн [11...12]. Повторный рост интереса к использованию скважинных сейсмоакустических измерений пришелся на 2014...2016 гг. и привел к появлению новых публи-

каций, посвященных оценке параметров грунтоцементных колонн [13...15].

Рост темпов подземного строительства и широкое применение технологии jet grouting увеличивают интерес к методам неразрушающего контроля качества грунтоцементных сооружений.

### **Особенности струйной цементации грунтов и применяемые методы контроля качества работ**

Основные преимущества технологии струйной цементации [8, 16]: отсутствие вибрационных и ударных нагрузок; высокая скорость производства работ; небольшой диаметр лидерного бурения; широкий диапазон геометрических, прочностных и фильтрационных характеристик ГЦС.

В процессе накопления практического опыта применение струйной цементации разделилось на два основных направления по назначению конструкций: устройство армированных грунтоцементных элементов и устройство противофильтрационных конструкций.

Первое направление охватывает устройство новых и усиление существующих фундаментов, подпорных стенок, геотехнических барьеров. Основными выходными параметрами являются прочностные характеристики грунтоцемента и сечение армирующего элемента. Второе направление предполагает использование ГЦС со сравнительно большими диаметрами для сооружения противофильтрационных завес, забирки, устройства днища камер и котлованов, пригрузки монтажных/демонтажных камер при щитовой проходке. При решении данных задач для достижения более высоких показателей энергоэффективности применяется двух- и трехкомпонентная цементация [17...18].

Согласно действующим на территории России нормативно-техническим документам, приёмка работ по сооружению грунтоцементных конструкций состоит из следующих этапов [19...20]: входной контроль качества применяемых материалов и оборудования, операционный контроль отдельных процессов или производственных операций в процессе их выполнения, приёмочный контроль по завершению производства работ.

К приёмочному контролю относятся следующие методы испытаний:

- контроль формы сечений ГЦС с применением шурфления;
- отбор кернов из ГЦС в любых точках поперечного и продольного сечений;
- контроль сплошности грунтоцементного массива методом контрольного бурения или зондирования;
- испытания отдельных ГЦС или массива из нескольких элементов статическими нагрузками.

В рамках развития данного направления контроля получено достаточно много результатов [6, 8, 16...18, 21...23]: обобщенные зависимости предела прочности на сжатие от физико-химических свойств материала, подтверждаемые в ряде случаев расчеты диаметра ГЦС в зависимости от типа грунта и технологических параметров изготовления свай; критерии для оценки эффективности выполняемых работ и др.

Стоит отметить, что испытания, требующие вскрытия конструкции, не всегда применимы на практике. Методы, основанные на разбуривании свай по оси и на нескольких расстояниях по радиусу от неё, отличаются высокой стоимостью и затратами по времени. Определение предела прочности по керну относится к данной точке тела свай и не дает общую характеристику материала конструкции. Определение фактического диаметра по результатам бурения скважин может дать предельные оценки, но при глубине заложения ГЦС в 10 м и более и при отсутствии данных инклинометрии правильное взаимное позиционирование нескольких скважин практически невозможно.

Проблемой при оценке качества устройства грунтоцементного массива, помимо его геометрических параметров, является также определение степени его однородности по показателю предела прочности материала.

Определение интегральных деформационных, прочностных и физических характеристик грунтоцементных свай и массивов возможно с использованием косвенных, геофизических методов неразрушающего контроля, среди которых центральную роль занимают методы, основанные на использовании направленных упругих волн.

Основными параметрами конструкций, определяемыми волновыми методами, являются сплошность и геометрические размеры. Условие сплошности для области  $W$  можно определить следующим образом: в каждой точке  $\tau_i \in \Omega$ , где  $i = 1, 2, \dots$ , выполняется условие:

$$R_c(\tau_i) \geq R_p, \quad (1)$$

где  $R_c$  – значение определяемого параметра (например, предела прочности),  $R_p$  – заданное (проектное) значение.

Согласно требованиям [19], предельные отклонения определяемых величин от заданных значений в сторону уменьшения составляют не более 10%.

### Сейсмоакустические методы обследования грунтоцементных свай

Методика контроля одиночных грунтоцементных свай основана на скважинных сейсмоакустических наблюдениях с электроискровым источником [24]. Возбуждение упругих волн производится в заполненной флюидом скважине в теле сваи, приемник (гидрофон) регистрирует волны разных типов, распространяющиеся по жидкости, внутренней поверхности ствола скважины, телу ГЦС и вмещающему грунту. Скорости распространения этих волн, их динамические характеристики и спектральный состав несут информацию о геометрии и упругих параметрах тела сваи.

Теоретической основой методики является теория распространения упругих объемных волн давления в заполненной жидкостью цилиндрической полости с податливыми массовыми стенками [25]. Скорость  $V$  упругой волны давления в «трубе с бесконечно толстыми стенками» (прямой аналог скважины, расположенной внутри грунтоцементного элемента) определяется свойствами заполняющей скважину жидкости и околоскважинного пространства:

$$V = V_0 \sqrt{\frac{\mu}{\mu + k}}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – модуль сдвига бесконечно толстой стенки трубы (околоскважинного пространства),  $k = \rho_0 V_0^2$  – модуль объемной упругости жидкости ( $\rho_0$  – плотность жидкости,  $V_0$  – скорость звука в жидкости).

При создании импульсного избыточного давления в заполняющей скважину жидкости, в околоскважинном пространстве, в теле ГЦС возникает поле давления, преимущественно состоящее из двух типов волн: высокочастотной продольной объемной волны давления и низкочастотной поперечной гидроволны Стоунли, распространяющейся вдоль стенки цилиндрической полости.

По времени пробега волн при известном взаимном расположении источника и приемника колебаний рассчитываются скорости распространения продольной объемной волны  $V_p$  и гидроволны  $V_{St}$ , которая определяется по формуле:

$$V_{St} = \frac{V_0}{\sqrt{1 + \rho_0 V_0^2 / \mu}}. \quad (3)$$

Через  $V_{St}$  возможно выразить скорость поперечных волн  $V_s$  с использованием формулы Уайта:

$$V_s = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho} \frac{V_{St}^2 V_0^2}{V_0^2 - V_{St}^2}}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность материала грунтоцементной сваи.

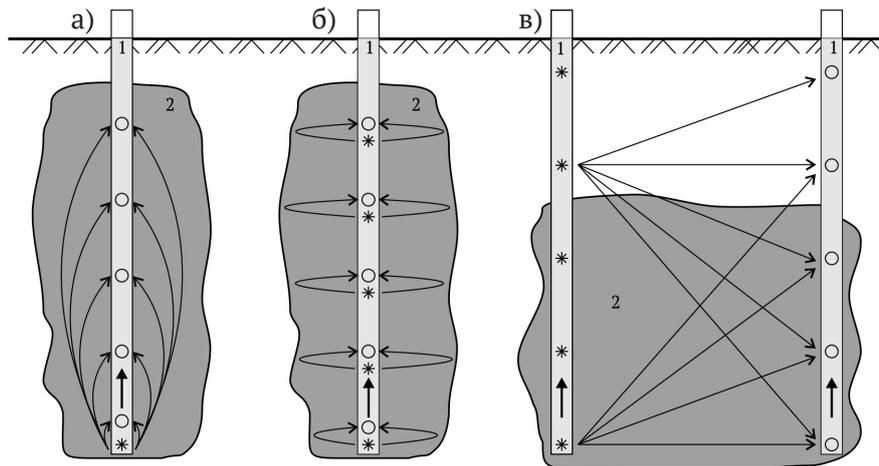
Возможность оценки скорости поперечных волн в материале ГЦС позволяет приближенно рассчитать динамические упругие константы вдоль оси скважины [3], такие, как модуль Юнга  $E$ , коэффициент Пуассона  $\nu$ , модуль сдвига  $\mu$  [26]:

$$E = \rho \frac{V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}, \quad (5)$$

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}, \quad (6)$$

$$\mu = \rho V_s^2. \quad (7)$$

Переход от значений скоростей упругих волн, модулей и плотности материала к пределу прочности материала на одноосное сжатие  $R_c$  и модулю деформации  $E_{\text{деф}}$  осуществляется по корреляционным зависимостям [27].



**Рис. 1.** Системы наблюдений при сейсмоакустическом контроле качества грунтоцементных свай и массивов (из [24], с изменениями): а – потенциальный, б – дифференциальный каротажи, в – межскважинное просвечивание; \* – источник колебаний, O – приемник колебаний, → – направление перемещения датчиков, → – траектории распространения упругих волн, 1 – скважина, 2 – грунтоцемент

Применение спектрального анализа позволяет дать оценку диаметра грунтоцементной колонны. Между материалом грунтоцементного элемента и вмещающим грунтом возникает больший или меньший контраст акустических жесткостей, поэтому возбуждаемая в конструкции волна распространяется от источника в сторону контрастной границы и обратно, создавая многократные переотражения по принципу явления толщинного резонанса [1, 3]. При рассчитанных по данным потенциального каротажа на отметках глубин  $h_i$  скоростях объемных продольных волн эффективный диаметр сваи  $D(h_i)$  можно рассчитать по:

$$D(h_i) = \frac{V_p(h_i)}{2f(h_i)}, \quad (8)$$

где  $f(h_i)$  – частота минимума модуля спектра (соответствующая полуволновому резонансу), полученная по данным дифференциального каротажа,  $i = 1, 2, 3, \dots$

Контроль качества одиночной ГЦС выполняется в три этапа. Первый цикл измерений выполняется по методике «потенциального каротажа» (downhole seismic logging, рис. 1, а): один из датчиков располагается неподвижно на забое скважины, в то время как второй перемещается по стволу скважины до устья с заданным шагом, обычно не превышающим 0,5 м. Желательным является шаг регистрации в 0,1 м, позволяющий считать каротажные измерения практически непрерывными (длины регистрируемых волн составляют от десятков см до нескольких м).

Второй цикл наблюдений ведется по методике «дифференциального каротажа» (sonic logging, рис. 1б): источник и приемник фиксируются на постоянной базе (обычно в 0,5...1,0 м) и совместно перемещаются снизу вверх по стволу скважины с шагом не более 0,5 м (рекомендации по выбору шага в 0,1 м сохраняют силу). Третий цикл наблюдений (опциональный) также ведется по методике «дифференциального каротажа», с увеличением базы прозвучиваний до 1,0...2,0 м. Это позволяет оценить стабильность получаемых волновых картин при изменении времен пробега целевых волн.

Вопрос о количестве накоплений сигнала для каждого положения «источник-приёмник» решается в зависимости от уровня механических шумов во время производства работ и возможности получения данных с удовлетворительным соотношением сигнал/шум (пять и более раз). Сроки проведения испытаний назначаются исходя из набора необходимой прочности грунтоцементом и обычно составляют не менее 14 сут от сооружения конструкции.

Таким образом, комплекс сейсмоакустических наблюдений позволяет дать оценку следующим характеристикам грунтоцементного элемента: скоростным (интервальные скорости  $V_p$ ,  $V_{St}$ ,  $V_s$ ); водно-физическим ( $V_s/V_p$ ); деформационным ( $E$ ,  $\nu$ ,  $\mu$ ); геометрическим ( $D$ ); прочностным ( $R_c$  и модуль деформации  $E_{\text{деф}}$ ).

Применение описанных подходов проиллюстрируем на примерах результатов полевых исследований. На рис. 2а представлен пример характерной волновой картины: на сейсмограмме, полученной по методике потенциального каротажа, выделяются целевые годографы (высокочастотный и малоампли-

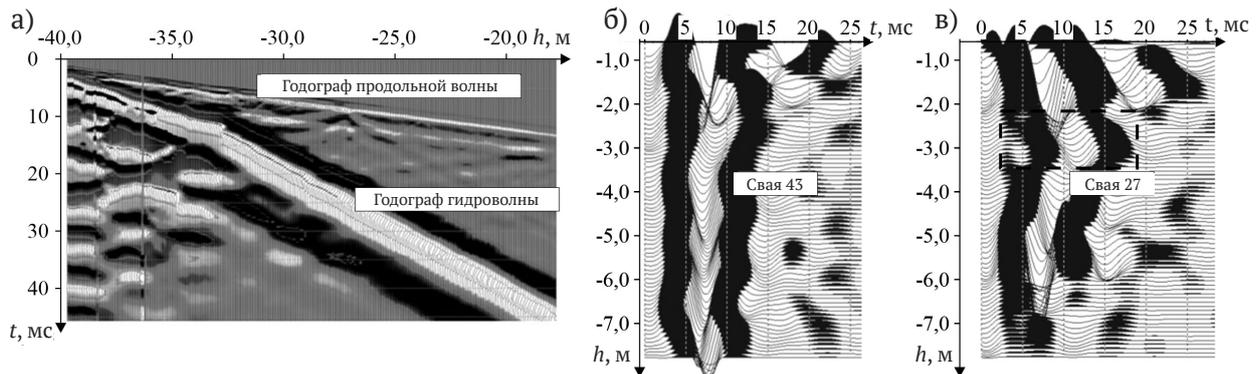


Рис. 2. Примеры регистрируемых волновых картин: а – потенциальный каротаж, б, в – дифференциальный каротаж; ----- - интервал с пониженными значениями прочности грунтоцемента

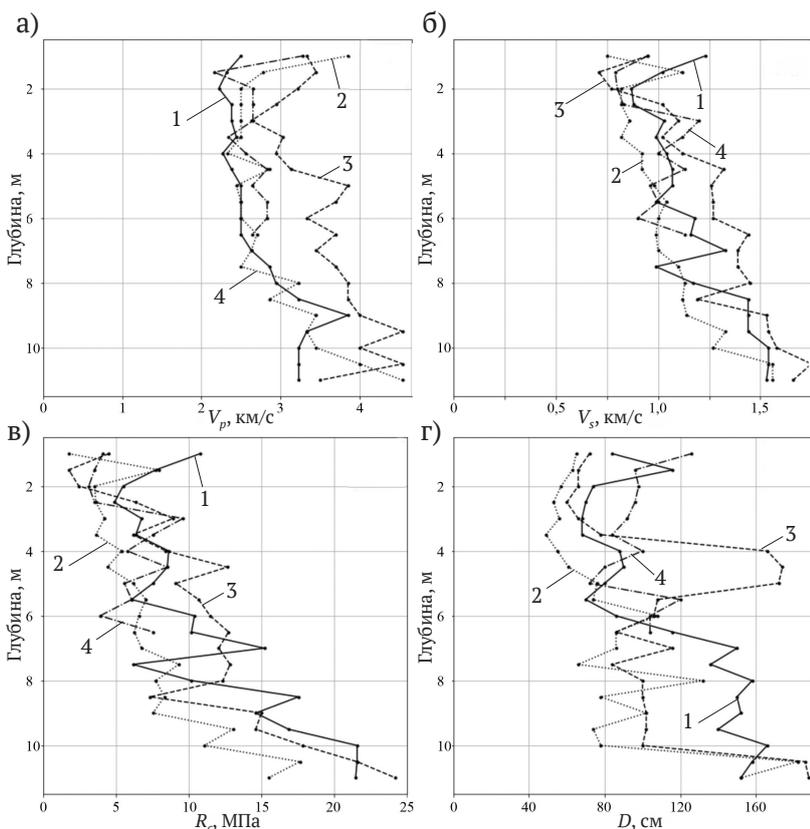


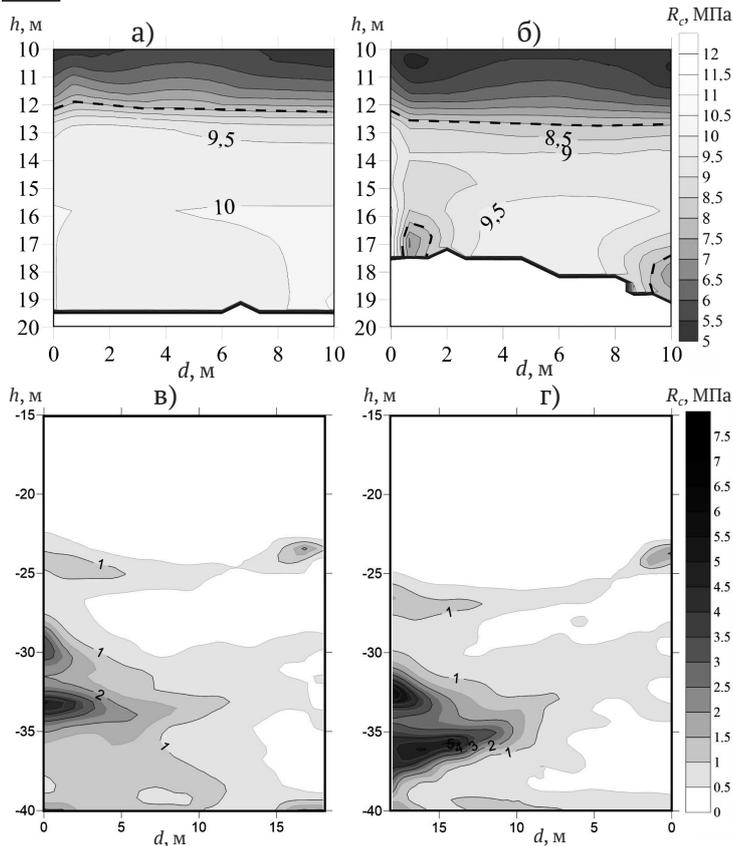
Рис. 3. Результаты сейсмоакустического каротажа грунтоцементных свай: а) скорость распространения продольной объемной волны  $V_p$ ; б) скорость распространения гидроволны  $V_{St}$ ; в) прочность на одноосное сжатие; г) эффективный диаметр свай  $D$ ; 1...4 - номера свай

тудный продольной волны и низкочастотный и высокоамплитудный годограф гидроволны). Сравнение записей, полученных по методике дифференциального каротажа (рис. 2б и 2в), дает возможность выделения аномальных зон в теле изучаемых свай по заметному изменению времени прихода и/или амплитудно-частотного состава регистрируемого сигнала. На рис. 3 представлены параметры четырех ГЦС, рассчитанные по данным комплекса каротажей. Хорошая сходимость скоростей волн и предела прочности на одноосное сжатие для всех четырех конструкций позволяет говорить о корректно выбранной методике проведения полевых измерений и обработки данных. Результаты расчета эффективного диаметра, согласно формуле (8), позволили предположить наличие уширения на относительных глубинах 4...5 м в теле одной из ГЦС. К сожалению, экскавация или поверочное бурение для данной сваи не производились.

### Сейсмоакустический контроль качества грунтоцементных массивов

Для контроля качества закрепленных с применением струйной цементации массивов, имеющих значительные размеры в плане, каротаж в отдельных скважинах теряет информативность. Поэтому для оценки степени однородности и физико-механических характеристик конструкций используется межскважинное сейсмоакустическое просвечивание (МСП, crosshole seismic logging).

Методика МСП предполагает размещение в двух скважинах, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, источников и приемников сейсмических волн. Производится последовательное возбуждение сигналов в одной скважине, регистрация волн в другой скважине. Просвечивание осуществляется по веерной схеме – для каждого положения точки возбуждения используются все положения точки приема. Образованные пары «источник–приёмник» создают плотную сеть лучей, заполняющую пространство между скважинами (рис. 1в). Для каждой пары определяются времена прихода сейсмических волн (пикируется годограф первых вступлений продольных и/или попе-



**Рис. 4.** Результаты обработки данных МСП по методике межскважинной сейсмической томографии для случая: удачного (а) и неудачного (б) закрепления грунта; ---- - границы области закрепления, где достигнуты проектные требования по прочности на одноосное сжатие

го диапазона глубин закрепления). Разрез, полученный для второй пары скважин, позволяет предположить наличие в обследуемом массиве участков локального нарушения сплошности, по размерам в плане не превышающих первых метров. Кроме того, из-за завала в одной из скважин не удалось получить информацию для нижней части обследуемого сечения.

Результаты для второго объекта исследований позволяют показать случай неудавшегося закрепления (рис. 4б). Сечения для двух пар скважин демонстрируют отсутствие в интервале глубин закрепления (30...40 м) сплошной структуры, однородной по физико-механическим свойствам. Ни о каком достижении проектных требований к геометрии и прочностным характеристикам массива в подобной ситуации говорить не приходится.

### Вопросы практики применения геофизических методов для контроля качества грунтоцементных конструкций

В сравнении с прямыми методами контроля одиночных грунтоцементных свай и массивов (шурфление, отбор кернов, статическое и динамическое зондирование), активно применяемыми в практике подземного строительства, геофизические методы не получили должного закрепления в российских нормативных документах.

Например, в [19] содержится рекомендация по обеспечению контроля «качества закрепления грунтов в отношении сплошности и однородности закрепления, формы и размеров закрепленного массива, прочностных, деформационных и других физико-механических свойств» с помощью геофизических методов. Однако никаких требований по применяемым методам и объемам контрольных работ документ не содержит (по аналогии с вопросом контроля длины и сплошности свайных фундаментов, разработанным существенно более подробно в [28]).

Регламентирование контроля качества армированных ГЦС представляет собой еще не решенную проблему. В [20] предложен некорректный способ определения длины и сплошности

речных волн). Использование алгоритмов сейсмической томографии позволяет восстановить распределение скорости волн в межскважинном пространстве.

Примеры результатов инверсии данных МСП позволяют наглядно проиллюстрировать необходимость применения межскважинных томографических наблюдений при оценке качества закрепления грунтов. Представленные на рис. 4 скоростные разрезы были пересчитаны в разрезы предела прочности на одноосное сжатие по корреляционной зависимости [27]:

$$(1 - R_c / R_{c\_max})^2 = 1 - (V_p / V_{p\_max})^2, \quad (9)$$

которая описывает связь между скоростью распространения продольных волн  $V_p$  и пределом прочности на одноосное сжатие  $R_c$  для скальных пород различных типов при заданных максимальных значениях  $V_{p\_max}$  и  $R_{c\_max}$ .

Результаты для двух пар скважин, полученные для двух пар скважин (рис. 4а), показывают однородность свойств массива в интервале глубин закрепления (12...20 м) и достигнутое значение прочности сцементированного грунта, превышающее требуемые согласно проекту 8 МПа (условие (1)), выполняется для всего

свай с применением сейсмоакустического метода. Подробную критику положений можно найти в работе [29].

Особенность устройства отдельно стоящих армированных ГЦС, усложняющая применение геофизических методов, состоит в армирующем элементе, расположенном в их геометрическом центре. Его материал (как правило, сталь) является источником помех для проведения скважинных сейсмоакустических и георадиолокационных измерений. По этой причине армирующий элемент не может быть использован в качестве канала доступа для каротажного оборудования.

Поверхностный сейсмоакустический метод может быть успешно использован для определения длины армирования. Вопрос получения косвенной информации о состоянии грунтоцементной сваи требует дальнейшей разработки с применением натуральных экспериментов и физического и математического моделирования. В качестве одного из путей решения можно предложить разделение вклада быстрой высокочастотной стержневой волны, возбуждаемой в армировании, и медленной продольной волны, передающейся в тело ГЦС при колебании армирования, в регистрируемый акустический отклик.

Для выполнения контроля качества армированных грунтоцементных свай потенциально могут быть использованы следующие геофизические методы:

- наблюдение в устроенной параллельно оси армирующего элемента скважине с применением акустического или георадиолокационного каротажа [1...3];
- оценка глубины заложения сваи с применением электроразведки (например, с использованием модификации метода сопротивлений, предложенной в работе [30]).

Большой интерес для развития методики каротажа представляет анализ динамических характеристик сигналов (например, связанных с характером поглощения энергии атрибутов нормированного спектра, предложенных в работе [31]). Подходы к методам оценки параметра добротности (Q-factor) предложены в работе [32]. Перспективы имеет разработка методики оценки фильтрационных свойств материала ГЦС по изменению динамических характеристик гидроволны (связанных с проницаемостью околоскважинного пространства), однако она пока не получила необходимого развития.

С выходом первого в своем роде российского нормативного документа [33], регламентирующего применение методов «технической геофизики» [24] для обследования геотехнических конструкций появились новые возможности для развития практики контроля качества грунтоцементных свай и массивов геофизическими методами, так что можно надеяться, что поставленные статьи вопросы будут исследованы более детально.

### Выводы

Показана целесообразность включения геофизических методов в комплекс мер инструментального контроля качества конструкций и массивов, полученных с применением струйной цементации. Проведение геофизических изысканий с целью контроля качества скрытых работ по струйной цементации должно регулироваться нормативными документами.

Комплекс из скважинных сейсмоакустических методов позволяет дать удовлетворительную для практических нужд оценку ряда параметров (геометрия, сплошность, физико-механические и водно-физические свойства) грунтоцементных свай и массивов.

Разработанные методики контроля качества грунтоцементных массивов и сооружений пока еще далеки от совершенства, тем не менее в них заложен довольно большой потенциал для дальнейшего развития.

Рассмотренный в статье комплекс скважинных сейсмоакустических методов также может быть применен для исследования массивов грунтов, закрепленных с применением других технологий.

### Список литературы

1. Владов М. Л., Калинин В. В., Старовойтов А. В., Шалаева Н. В. Опыт сейсмоакустического обследования грунтоцементных свай // Разведка и охрана недр. — 2005. — № 12. — С. 34–38.
2. Черняков А. В., Богомолова О. В., Капустин В. В., Владов М. Л., Калинин В. В. Контроль качества геотехнических конструкций, созданных методом струйной цементации // Технологии сейсморазведки. — 2008. — № 3. — С. 97–103.
3. Капустин В. В. . Использование технологий направляемых акустических волн для исследования грунтов и строительных конструкций // Технологии сейсморазведки. — 2012. — № 1. — С. 72–78.
4. Черняков А. В., Богомолова О. В., Капустин В. В., Истратов В. А., Бобачев А. А. Применение комплекса геофизических и геотехнических методов для организации контроля качества скрытых работ и мониторинга при крупном городском строительстве // Геотехника. — 2013. — № 1. — С. 4–21.

5. Arkhipov A. Check and monitoring of condition of concrete slurry wall, jet-grouting and frozen soil fences by crosshole sounding method in underground construction // *Procedia Engineering*. — 2016. — № 165. — Pp. 11–18.
6. Langhorst O. S., Schat B. J., et al. Design and validation of jet grouting for the Amsterdam Central Station // *Proceedings of XIV European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. — Madrid, 2007. — Pp. 20–23.
7. Ciufegni S., Marcheselli G., Sdoga S., Bellicchi L., Bruzzi G. Il nuovo ponte sul fiume Po a Ostiglia // *Strade and Autostrade*. — 2007. — № 4. — P. 156-162.
8. Croce P., Flora A., Modoni G. Jet grouting. Technology, Design, Control. — CRC Press, 2014. — Pp. 304.
9. Axtell P. J., Stark T. D. Increase in shear modulus by Soil Mix and Jet Grout methods // *DFI Journal*. — 2008. — № 1. — Pp. 11–21.
10. Meinhard K., Adam D., Lackner R. Temperature measurements to determine the diameter of jet-grouted columns // *Proceedings of 11th International Conference on Geotechnical Challenges in Urban Regeneration*. — London, 2010 — p. 8.
11. Farooq M., Park S., Kim J. H., et al. Time-Lapse Electrical Resistivity Investigations for Imaging the Grouting Injection in Shallow Subsurface Cavities // *The Scientific World Journal*. — 2014. — № 178203. DOI: 10.1155/2014/178203.
12. Bearce R. G., Mooney M. A., Kessouri P. Electrical Resistivity Imaging of Laboratory Soilcrete Column Geometry // *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. — 2016. — № 3. — P. 10. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001404.
13. Bearce R., Mooney M., Niederleithinger E., Revil A. Characterization of Simulated Soilcrete Column Curing Using Acoustic Tomography // *Geo-Congress 2014 Technical Papers*. — 2014. — P. 465–474. DOI: 10.1061/9780784413272.044.
14. Mackens S., Fechner T., Rios N. I. C., Tweeton D., Guerreros J. C. G., Niederleithinger E. A new approach to determine the diameter of a jet grouted column using seismic methods // *Proceedings of SAGEEP*. — Austin, Texas, 2015. — P. 5.
15. Guerreros J. C. G., Niederleithinger E., Mackens S., Fechner T. Crosshole and downhole seismics: a new quality assurance tool for jet grout columns // *Near Surface Geophysics*. — 2016. — № 14. — P. 493–501. DOI: 10.3997/1873-0604.2016042.
16. Малинин А. Г. Струйная цементация грунтов. — М.: Стройиздат, 2010. — 226 с.
17. Засорин М. С. Эффективность технологии струйной цементации грунтов // *Геотехника*. — 2017. — № 3. — С. 40–45.
18. Croce P., Flora A., Lirer S., Modoni G. Prediction of jet grouting efficiency and column average diameter // *Proceedings of "ICSMGE-TC211 (International Symposium on Ground Improvement)"*. — Brussels, Belgium, 2012. — P. 215–224.
19. СП 45.13330.2017 Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87.
20. СП 291.1325800.2017 Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования.
21. Malinin A., Gladkov I., Malinin D. Experimental research of jet grouting parameters in different soil conditions // *Proceedings of sessions of "GeoShanghai 2010 International Conference"*. — Shanghai, China, 2010. — P. 49–54. DOI: 10.1061/41107(380)7.
22. Flora A., Lirer S., Monda M. Probability design of massive jet grouted water sealing barriers // *Proceedings of Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing*. — New Orleans, LA, USA, 2012. DOI: 10.1061/9780784412350.0178.
23. Ni J. C., Cheng W.-C. Quality control of double fluid jet grouting below groundwater table: Case history // *Soils and Foundations*. — 2014. — № 6. — Pp. 1039–1053. DOI: 10.1016/j.sandf.2014.11.001.
24. Капустин В. В., Владов М. Л. Техническая геофизика. Методы и задачи // *Геотехника*. — 2020. — № 4. — С. 72–85. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85.
25. Уайт Дж. Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. — М.: Недра, 1986. — 262 с.
26. Боганик Г. Н., Гурвич И. И. Сейсморазведка. — Тверь: АИС, 2006. — 744 с.
27. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / Министерство геологии СССР; под ред. Н.Н. Горяинова. — М.: Недра, 1992. — 264 с.
28. Дзагов А. М., Шейнин В. И., Костенко Е. С., Блохин Д. И. К вопросу о назначении объемов работ по контролю качества бетона набивных и буровых свай // *Геотехника*. — 2017. — № 1. — С. 64 – 69.
29. Мухин А. А., Капустин В. В., Чуркин А. А., Лозовский И. Н. О техническом регулировании неразрушающего контроля сплошности свай // *Геотехника*. — 2019. — № 2. — С. 80–89. DOI: 10.25296/2221-5514-2019-11-2-80-89.
30. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности / Под ред. проф. В. А. Шевнина и доц. И. Н. Модина. — М.: РУССО, 1999. — 511 с.
31. Kapustin V. V., Churkin A. A. Assessment of the contact between piles and soil via the dynamic attributes of acoustic signals // *Moscow University Geology Bulletin*. — 2020. — № 4. — Pp. 435-445. DOI: 10.3103/S0145875220040092.
32. Shmurak D. V. Determination of the Attenuation Factor via Seismoacoustic Studies in Wells to Estimate the Distribution of Heterogeneities in Artificial Soils // *Moscow University Geology Bulletin*. — 2020. — Vol. 75. — Pp. 537–541. DOI: 10.3103/S0145875220050087.
33. Руководство по контролю качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве подземных объектов, включая объекты метрополитена, на территории Москвы – М.: Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы, 2021. -114 с.