

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ СВАЙ

© 2020 г. И.Н. Лозовский<sup>1,2,\*</sup>, Р.А. Жостков<sup>3,\*\*</sup>, А.А. Чуркин<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ООО «ЭГЕОС», Россия 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, вл. 8, стр. 3

<sup>2</sup>Центр геоэлектромагнитных исследований – Филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия 108840 Москва, г. Троицк, а/я 30

<sup>3</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия 123242 Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1  
E-mail: \*piles@aigeos.ru; \*\*shageraxcom@yandex.ru; \*\*\*piles@aigeos.ru

Поступила в редакцию 26.06.2019; после доработки 20.09.2019

Принята к публикации 24.09.2019

Несоответствие формы или материала свай требованиям проектной документации может приводить к недопустимому снижению несущей способности фундаментов возводимых зданий и сооружений. С целью контроля качества изготовленных в грунте железобетонных свай проводят полевые испытания с применением неразрушающих геофизических методов. Ультразвуковой контроль сплошности бетона основан на анализе параметров упругих волн, возбуждаемых и регистрируемых в теле свай с помощью датчиков, погруженных в установленные в составе арматурного каркаса трубы доступа.

Для уточнения подходов к интерпретации данных ультразвукового метода в программном комплексе COMSOL Multiphysics выполнено численное моделирование распространения упругих волн. Исследования проводились для серии двумерных моделей буронабивных свай без дефектов, с включениями грунта или с нарушением сцепления труб доступа с бетоном.

Сделаны выводы о возможностях и ограничениях метода. Показано влияние на результаты измерений местоположения и геометрических размеров дефектов, а также нарушения сцепления труб доступа с бетоном. Указано на необходимость дополнительного исследования аномалий по методике межскважинной томографии для подготовки выводов о возможности последующего использования сваи в составе фундамента. Приведены общие рекомендации относительно количества труб доступа, которое следует устанавливать в сваю, и по выбору интервала времени для расчета затухания. Показана некорректность расчета прочности материала сваи по зарегистрированным значениям скорости распространения волн.

*Ключевые слова:* численное моделирование, неразрушающий контроль, буронабивные сваи, фундаменты глубокого заложения, контроль сплошности свай, ультразвуковая дефектоскопия, ультразвуковой метод контроля сплошности свай.

**DOI:** 10.31857/S0130308220010017

### ВВЕДЕНИЕ

Буронабивные сваи представляют собой цилиндрические бетонные или железобетонные конструкции, устраиваемые в грунте путем укладки бетонной смеси в скважины для передачи нагрузки от возводимых зданий и сооружений на грунтовое основание. Дефекты буронабивных свай (сужение ствола свай; включения грунта, бетона пониженной прочности, воды, бентонита и пр.) могут служить причиной снижения прочности и долговечности фундаментов, недопустимых деформаций и даже разрушения зданий и сооружений.

Прямые методы контроля качества, такие как выбуривание образцов керна или экскавация, не позволяют получить исчерпывающие сведения о сплошности бетона свай, а часто невозможны по технологическим, градостроительным или экономическим соображениям. Для контроля сплошности свай применяют косвенные неразрушающие методы: ультразвуковой, сейсмоакустический, термометрический и др. [1—4]. Для изучения области применения методов, особенностей методики измерений и подходов к интерпретации данных применяют численное и физическое моделирование [5—13]. С целью исследования возможностей и ограничений ультразвукового контроля, изучения влияния на данные метода местоположения и геометрических размеров дефектов, а также нарушения сцепления труб доступа с бетоном с помощью специального программного обеспечения [14], созданного в пакете COMSOL Multiphysics 5.4, выполнено двумерное численное моделирование.

### 1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 1.1. Ультразвуковой метод контроля сплошности бетона свай

Межскважинный ультразвуковой метод применяют для контроля сплошности изготовленных в грунте свай и других монолитных железобетонных конструкций начиная с конца 1960-х годов. Для проведения испытаний в тело свай в составе арматурного каркаса устанавливают стальные или

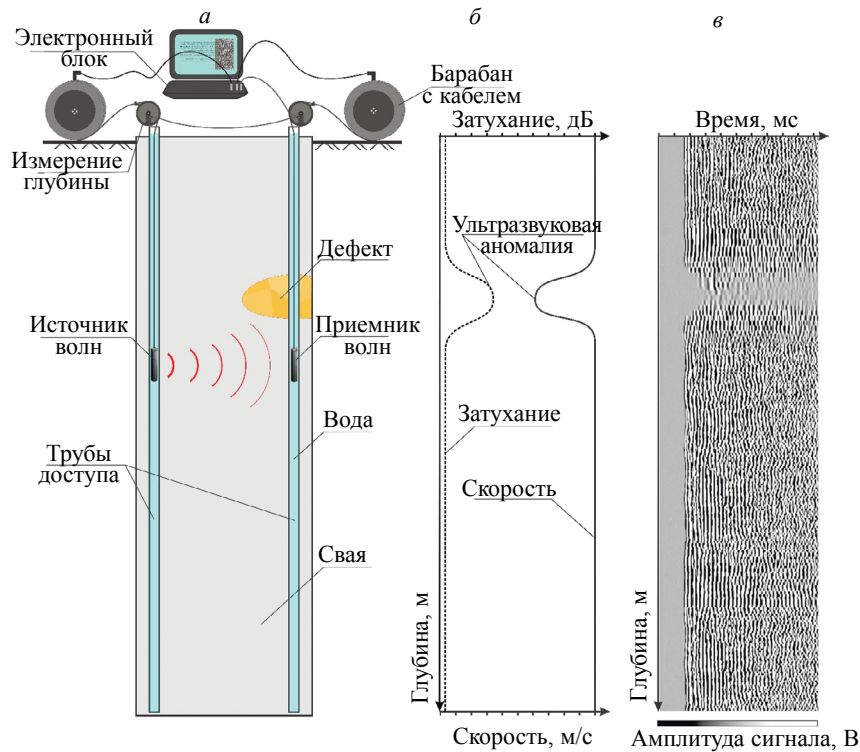


Рис. 1. Контроль сплошности бетона свай ультразвуковым методом:

*а* — схема проведения испытаний; *б* — графики скорости распространения и затухания ультразвуковых волн; *в* — сейсмограмма, составленная из всех сигналов, зарегистрированных на профиле измерений.

полимерные трубы доступа внутренним диаметром 40—55 мм и заполняют их водой. Измерения выполняют по методике параллельного прозвучивания [15, 16]. В одну трубу доступа до нижней отметки погружают источник, а в другую — приемник ультразвуковых волн. Далее датчики синхронно поднимают и с заданным шагом производят возбуждение и регистрацию ультразвуковых сигналов (рис. 1*а*). Результаты измерений представляют в виде графиков зависимости скорости распространения и затухания волн от глубины погружения датчиков (рис. 1*б*) и в виде сейсмограмм, составленных из всех сигналов, зарегистрированных на профиле измерений (рис. 1*в*).

Скорость распространения продольных волн в бетоне требуемого качества обычно составляет 3600—4400 м/с (в зависимости от его класса и возраста). Включения грунта, бетона пониженной прочности и пр. приводят к снижению скорости и повышению затухания волн. Для подготовки выводов о сплошности сваи на каждом профиле измерений проводят анализ локальных отклонений значений скорости и затухания от нормы с привлечением дополнительной априорной информации. В качестве зон нарушения сплошности рекомендуется рассматривать участки профилей наблюдений, на которых снижение скорости ультразвуковых волн составляет более 20 % от средней скорости на профиле, а параметра затухания — более 9 дБ [3, 17].

## 1.2. Численное моделирование ультразвукового контроля свай

Для изучения влияния местоположения и размера дефектов, а также нарушения сцепления труб доступа с бетоном на регистрируемые сигналы и на возможность выявления дефектов, в программном комплексе COMSOL Multiphysics 5.4 (модули Structural Mechanics и Acoustics, лицензия № 9600341) выполнено полномасштабное моделирование методом конечных элементов. Моделирование заключается в рассмотрении пространственно-временной эволюции поля упругих волн, возбуждающихся в исследуемой системе. Исходя из уравнения Ламе и закона Гука для упругой среды, а также системы гидродинамических уравнений для вязкой жидкости, получены численные решения, соответствующие всем типам волн (продольным, поперечным и поверхностным) — как возбуждаемых источником с помощью граничных условий, так и возникающих в результате отражения, преломления, дифракции и интерференции.

В качестве объектов моделирования выбраны железобетонные буронабивные сваи с ненарушенной сплошностью, с включением грунтового материала (дефектом) или с нарушением сцепления труб доступа с бетоном. Диаметр свай — 1000 мм. Защитный слой бетона (расстояние в свету между арматурным стержнем и боковой поверхностью сваи) — 100 мм. Армирование — 10 стальных стержней диаметром 25 мм. В сваи установлены 2 стальные трубы доступа 57×3 мм, заполненные водой.

В качестве материала дефектов задан водонасыщенный песок. Вмещающие сваю грунты представлены двумя слоями: песком и идеально согласованным поглощающим слоем со слабоотражающим условием на внешней границе, что приводит к почти полному отсутствию искажений, связанных с конечным размером модели.

Физические свойства моделируемых материалов описаны значениями плотности, скорости распространения продольных и поперечных волн, параметрами  $\alpha$  и  $\beta$  рэлеевской модели затухания [18, 19] (табл. 1). Для воды также заданы коэффициенты динамической (1 мПа·с) и объемной (3 мПа·с) вязкости.

Таблица 1

Свойства материалов

	Бетон	Вода	Песок (водонасыщ.)	Сталь	Воздух
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2400	1000	2000	7900	1,2
Скорость продольных ( $V_p$ ) / поперечных ( $V_s$ ) волн, м/с	4000 / 2450	1500	1800 / 540	5500 / 3200	330
Рэлеевская модель затухания. Коэффициенты $\alpha$ , с <sup>-1</sup> / $\beta$ , с	$2 \cdot 10^3 / 10^{-8}$	–	$2 \cdot 10^5 / 10^{-6}$	$2 \cdot 10^2 / 10^{-9}$	–

Источник и приемник ультразвуковых колебаний описаны как окружности диаметром 30 мм, соосные трубам доступа. На границе источника задано нормальное к поверхности смещение (зондирующий импульс, рис. 2). Центральная частота зондирующего импульса — 50 кГц. На поверхности приемника задано граничное импедансное условие, соответствующее материалу его корпуса (сталь). Приемник регистрирует изменение акустического давления в водной среде в зависимости от времени (осредненное значение по всей поверхности датчика) в течение 1,5 мс.

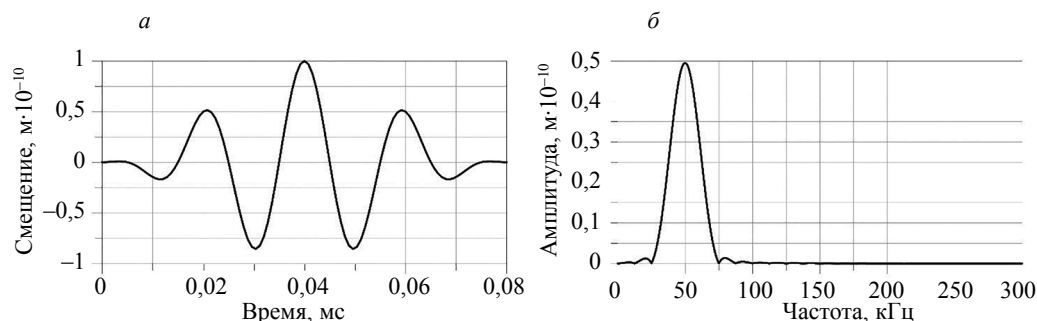


Рис. 2. Зондирующий импульс. Смещение поверхности источника в зависимости от времени (а) и амплитудный спектр (б).

Размер конечных элементов моделей выбран с учетом характерных размеров их составных частей и длины волны в материале таким образом, чтобы обеспечить ошибку расчета не более 0,5 %. Шаг по времени задан в соответствии с критерием Куранта — Фридрихса — Леви и составляет 27 нс.

Визуализация результатов моделирования выполнена в виде анимации, демонстрирующей распространение ультразвуковых волн в моделях (смещение частиц модели от равновесного состояния) и в виде сигналов, зарегистрированных приемником.

### 1.3. Обработка данных

Для каждого сигнала, зарегистрированного приемником, выполнено определение времени первого вступления (время, соответствующее первому отклонению значений амплитуды сигнала

от равновесного состояния на 1 мПа), скорости распространения и параметра затухания ультразвуковых волн.

Средняя скорость (далее — скорость) распространения ультразвуковых волн ( $V$ ) рассчитана по формуле

$$V = L / (t_0 - t_{\text{tube}}), \quad (1)$$

где  $L$  — расстояние между трубами доступа (686 мм);  $t_0$  — время первого вступления сигнала;  $t_{\text{tube}}$  — поправка за время распространения волн через воду и трубы доступа (14,6 мкс).

Параметр затухания ( $\gamma$ ), установленный [15] в качестве динамической характеристики сигнала, рассчитан по формуле

$$\gamma = -20 \cdot \lg(E / E_0), \quad (2)$$

где  $E$  — сумма абсолютных значений амплитуды рассматриваемого сигнала, зарегистрированных в каждый дискретный момент времени;  $E_0$  — аналогичная величина для сигнала, зарегистрированного в модели без дефектов.

Параметр затухания рассчитан в пределах двух промежутков времени: для всего сигнала (в течение 1,5 мс) и для интервала времени длиной 0,1 мс, начиная с момента первого вступления волн.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 2.1. Исследование влияния грунтовых включений на ультразвуковые сигналы

С целью исследования влияния грунтовых включений в бетоне сваи на зарегистрированные приемником сигналы выполнено полноволновое численное моделирование для трех моделей: модель 1 без дефектов и модели 2.1, 2.2 с грунтовыми включениями осесимметричной формы характерными размерами 200 и 350 мм (рис. 3). Центр включений совпадает с пересечением осей симметрии сваи.

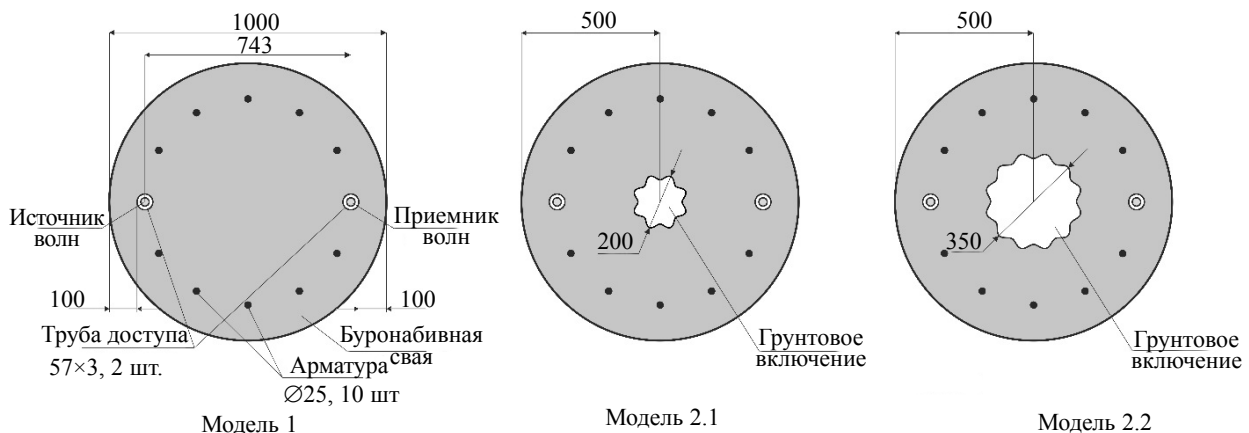


Рис. 3. Модель сваи без дефектов (модель 1), с дефектом размером 200 мм (модель 2.1) и дефектом размером 350 мм (модель 2.2).

На рис. 4—6 представлены поля абсолютных смещений в моменты времени 0,05, 0,1, 0,15, 0,2 и 0,25 мс, иллюстрирующие распространение ультразвуковых волн в моделях, и зарегистрированные приемником сигналы. Здесь и далее распространение волн во вмещающем сваю грунте и в трубах доступа условно не показано. На рис. 7 представлено сравнение значений скорости и параметра затухания ультразвуковых волн в моделях.

Перенос механической энергии волновыми процессами осуществляется преимущественно двумя механизмами: повсеместно сквозь толщу сваи и локализовано вдоль границы сваи с грунтом. В моделях 2.1 и 2.2 волны, распространяющиеся по прямолинейной траектории между источником и приемником, огибают грунтовые включения с пониженной относительно бетона акусти-

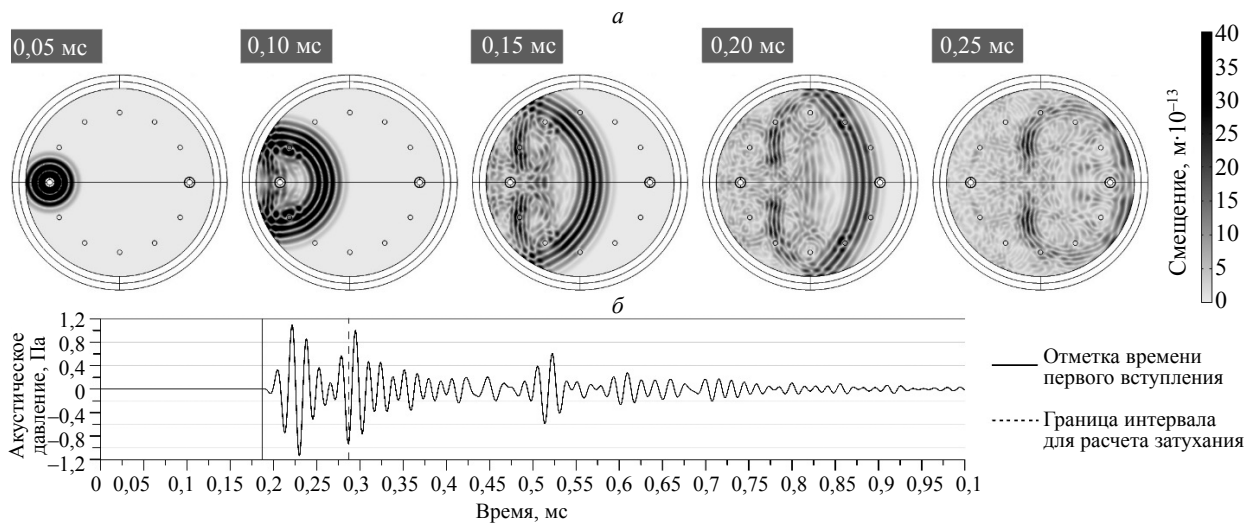


Рис. 4. Распространение ультразвуковых волн в модели 1 (а); сигнал, зарегистрированный приемником (б).

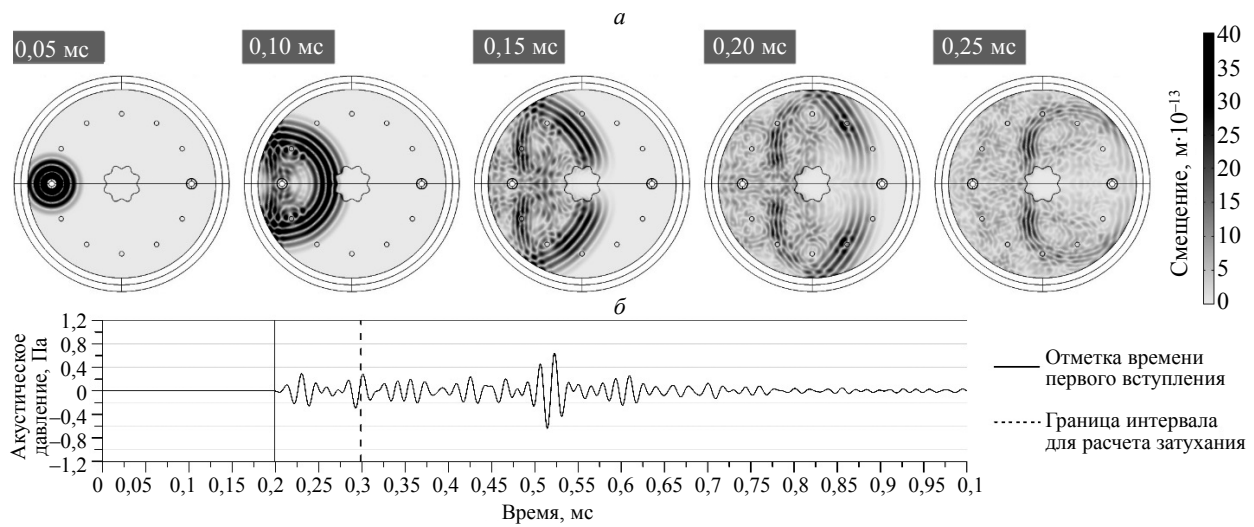


Рис. 5. Распространение ультразвуковых волн в модели 2.1 (а); сигнал, зарегистрированный приемником (б).

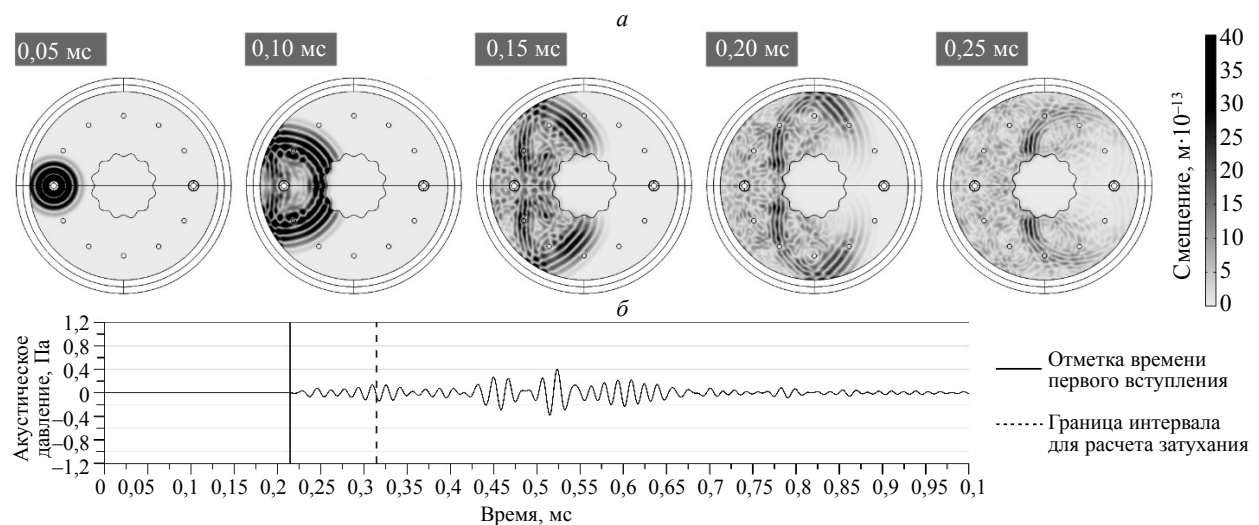


Рис. 6. Распространение ультразвуковых волн в модели 2.2 (а); сигнал, зарегистрированный приемником (б).

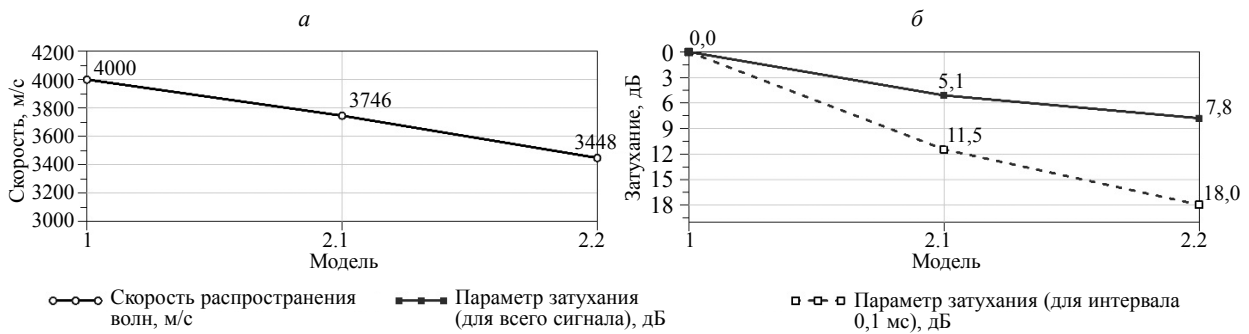


Рис. 7. Модели 1, 2.1, 2.2. Скорость распространения (а) и параметр затухания (б) ультразвуковых волн.

ческой жесткостью, что приводит к увеличению времени их пробега. Чем больше геометрический размер грунтового включения, тем позже время первого вступления и тем значительней снижение скорости распространения ультразвуковых волн.

Отражения от границ включения и повышенное поглощение в его материале приводят к снижению амплитуды волн, встретивших на своем пути дефект, что влечет увеличение параметра затухания сигнала в моделях 2.1 и 2.2. Значения параметра, рассчитанные в интервале времени 0,1 мс (начиная с момента первого вступления волн), выше значений, рассчитанных по всему зарегистрированному сигналу.

Затухание первого зарегистрированного приемником цуга волн (в пределах временного интервала 0,1 мс) характеризует материал сваи в узкой области между трубами доступа. Затухание, рассчитанное по всему сигналу, является интегральной характеристикой всего поперечного сечения сваи.

## 2.2. Исследование влияния местоположения грунтовых включений на ультразвуковые сигналы

С целью исследования влияния местоположения включений грунта в бетоне сваи на ультразвуковые сигналы выполнено численное моделирование для двух наборов моделей.

Исследование влияния дефектов, удаленных от плоского сечения сваи, ограниченного осями труб доступа, выполнено с помощью моделей 3.1 и 3.2 (рис. 8). Модель 3.1 изображает сваю с грунтовым включением, занимающим 33 % площади поперечного сечения и удаленным от отрезка между центрами труб доступа на 50 мм. Модель 3.2 изображает экстремальное сужение ствола сваи до 13 % от номинальной площади.

На рис. 9 и 10 показано распространение ультразвуковых волн и зарегистрированные приемником сигналы в моделях 3.1 и 3.2. На рис.11 представлено сравнение значений скорости и затухания ультразвуковых волн в моделях с дефектом (модели 3.1, 3.2) и без дефекта (модель 1). Времена первого вступления и, соответственно, скорости распространения волн идентичны для всех трех сигналов, так как волны, распространяющиеся по прямолинейной траектории, не встречают на своем пути препятствий. Параметр затухания сигнала в моделях 3.1 и 3.2 несущественно увеличивается в пределах интервала времени 0.1 мс и чуть больше — при расчете по всему сигналу.

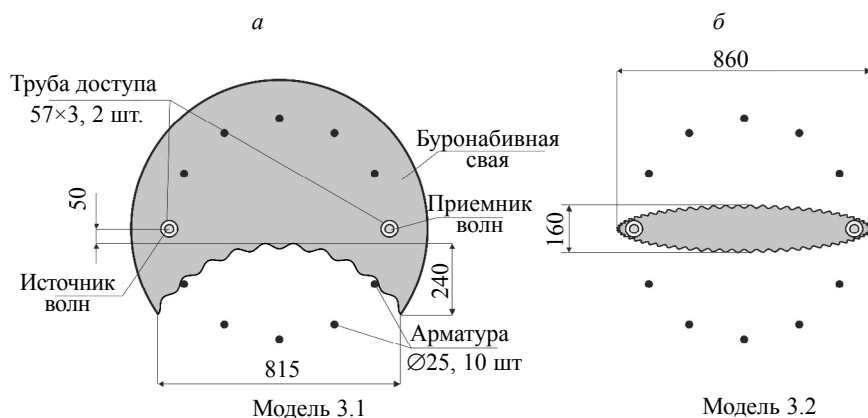


Рис. 8. Модель сваи с дефектом, удаленным от сечения сваи, ограниченного осями труб доступа (модель 3.1, а), и с экстремальным сужением поперечного сечения (модель 3.2, б).

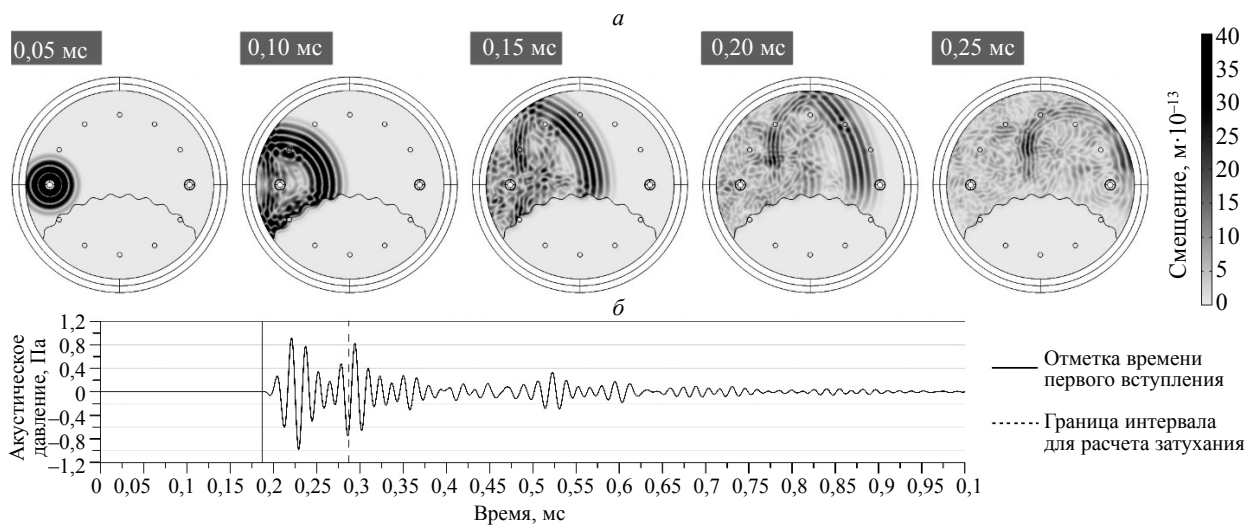


Рис. 9. Распространение ультразвуковых волн в модели 3.1 (а); сигнал, зарегистрированный приемником (б).

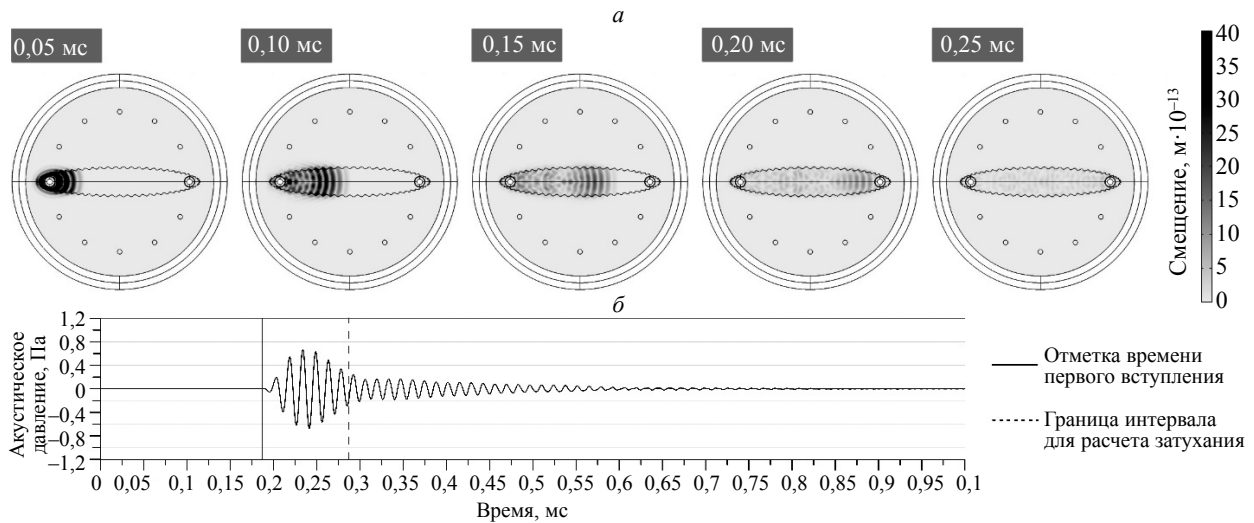


Рис. 10. Распространение ультразвуковых волн в модели 3.2 (а); сигнал, зарегистрированный приемником (б).

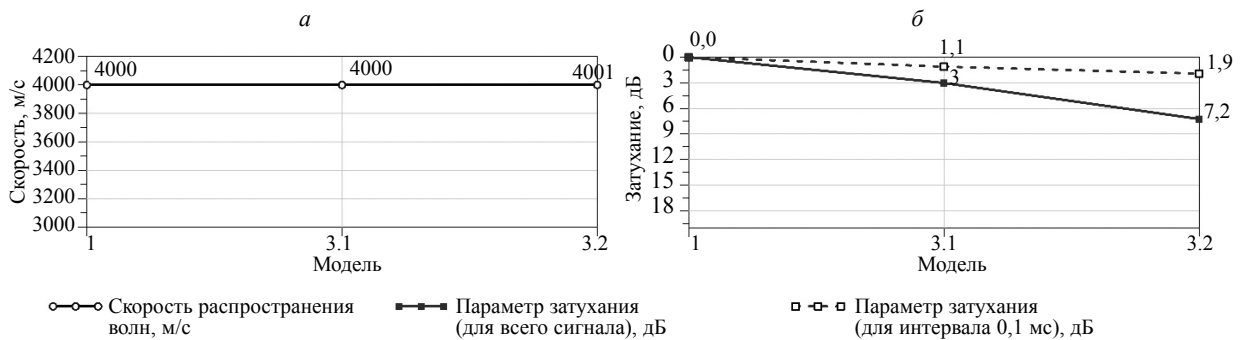


Рис. 11. Модели 1, 3.1, 3.2. Скорость распространения (а) и параметр затухания (б) ультразвуковых волн.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что дефекты, расположенные в стороне от сечения сваи, ограниченного осями труб доступа, не могут быть выделены по значениям скорости распространения волн, однако могут проявляться на ультразвуковых данных в виде снижения амплитуды сигнала (часто — несколько незначительного). Если в сваю установлены только 2 трубы доступа, контролю подвергается малая часть ее объема. Для увеличения контролируемой области

рекомендуется, в соответствии с [15], устанавливать в сваю не менее 3 труб доступа, по одной на каждые 250 — 300 мм ее диаметра.

Чтобы изучить, как скорость распространения и затухание волн зависят от расстояния между дефектом и трубой доступа, была составлена серия из 7 моделей (2.1, 3.3 — 3.8, рис. 3 и 12). В качестве дефекта в моделях задано грунтовое включение характерным размером 200 мм, удаленное на различное расстояние от труб доступа. Центры грунтового включения и труб доступа лежат на одной прямой.

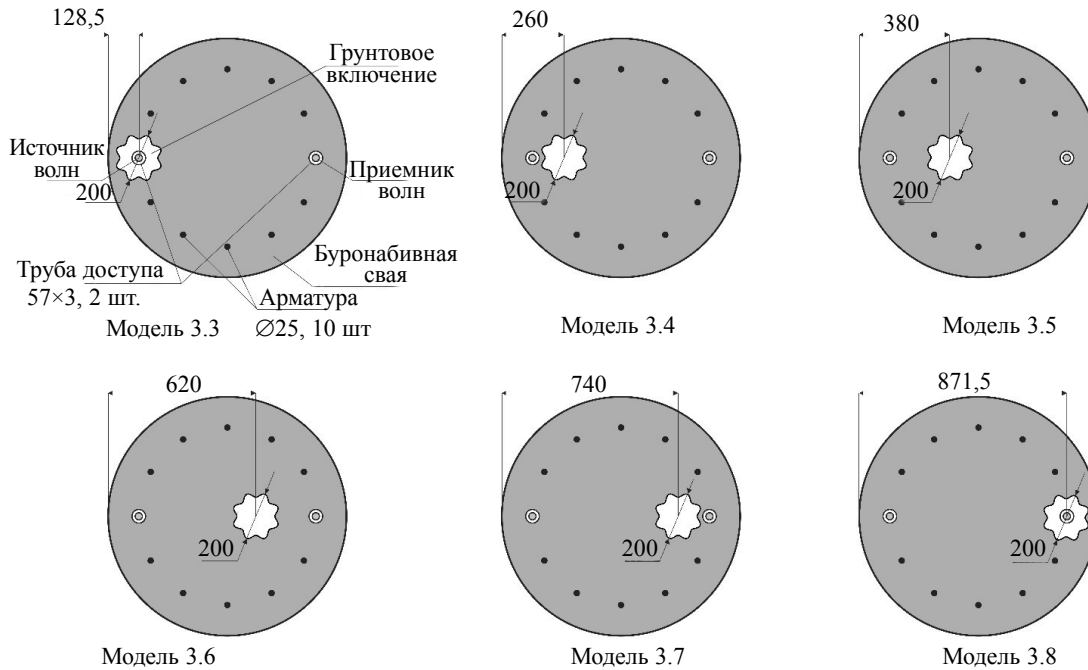


Рис. 12. Модели сваи с дефектами, расположенными на различном расстоянии от труб доступа (модели 3.3—3.8).

Скорость распространения и параметр затухания ультразвуковых волн представлены на рис. 13. По мере приближения дефекта к трубе доступа скорость волн снижается, а затухание увеличивается. В моделях 3.3 и 3.8, в которых труба расположена в центре дефекта, наблюдается самое значительное, почти полное затухание сигнала.

Прочность материала сваи задана в моделях одинаковой, но значения скорости распространения волн различаются. Данные результаты указывают на невозможность пересчета зарегистрированных в буронабивных сваях значений скорости ультразвуковых волн в значения прочности материала по применяемой в отечественной практике методике, установленной ГОСТ 17624—2012 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности».

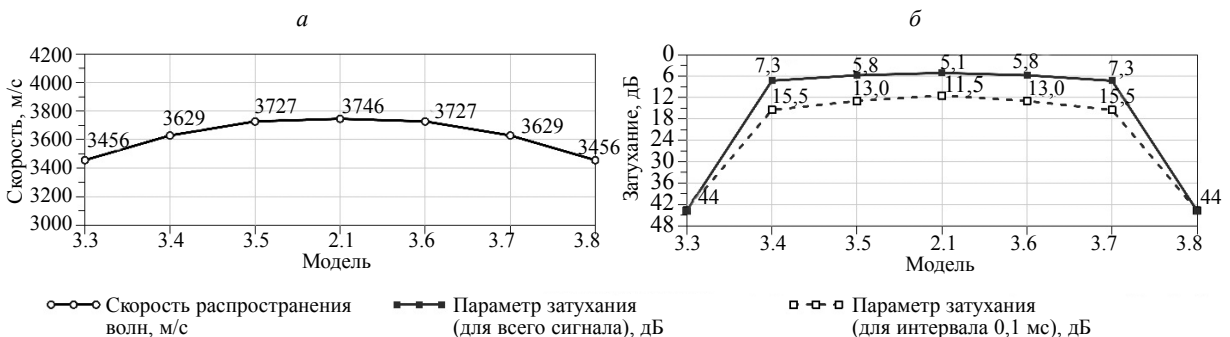


Рис. 13. Модели 2.1, 3.3 — 3.8. Скорость распространения (а) и параметр затухания (б) ультразвуковых волн.



### 2.3. Исследование влияния нарушения сцепления труб доступа с бетоном свай на ультразвуковые сигналы

Применение труб доступа из полимерного материала или недостаточное виброуплотнение бетонной смеси могут приводить к нарушению сцепления труб доступа с бетоном и образованию зазора между ними в верхней части свай. Для исследования влияния воздушного зазора между трубой доступа и бетоном на распространение ультразвуковых волн составлена модель 4 (рис. 14). Ширина зазора — 1 мм.

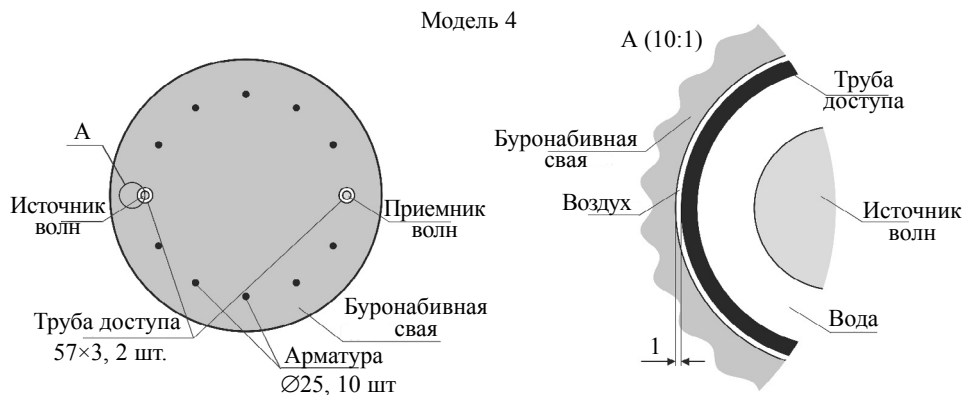


Рис. 14. Модель свай с воздушным зазором между трубой доступа и бетоном (модель 4).

Воздушный зазор препятствует распространению волн в теле свай. Критическое снижение амплитуды зарегистрированного в модели сигнала эквивалентно затуханию ультразвуковых волн в свае со значительным дефектом, что может стать причиной ложной интерпретации данных полевых измерений [20]. Для уточнения размеров и местоположения аномальных зон необходимо проведение дополнительных ультразвуковых измерений с применением томографической методики съемки [4, 21].

Для обеспечения непрерывной связи между бетоном и трубами доступа рекомендуется применение стальных незагрязненных труб, заполнение их водой сразу после бетонирования свай и проведение испытаний в минимальные допустимые сроки [3].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью исследования возможностей и ограничений ультразвукового контроля сплошности железобетонных свай в программном комплексе COMSOL Multiphysics выполнено полноволновое двумерное численное моделирование. Исследования проводились для серии моделей бурунабивных свай без дефектов, с включением грунта в различных секторах поперечного сечения или с нарушением сцепления труб доступа с бетоном.

Результаты моделирования представлены в графическом виде. Для каждого сигнала, зарегистрированного приемником, выполнено определение времени первого вступления, скорости распространения и параметра затухания ультразвуковых волн (для всего сигнала и для интервала времени 0,1 мс).

По результатам моделирования сделаны выводы:

1. Анализ параметров ультразвуковых волн (скорость распространения и затухание) не позволяет оценить размер и физические свойства дефектов. Например, небольшой дефект, расположенный в окрестности трубы доступа, может проявляться на ультразвуковых данных так же, как дефект значительного размера в середине сечения свай. Для локализации зон нарушения сплошности и подготовки выводов о возможности последующего использования свай в составе фундамента необходимо совместно анализировать данные, зарегистрированные во всех установленных в сваю трубах доступа, и проводить дополнительные исследования по методике межскважинной ультразвуковой томографии.

2. Зоны нарушения сплошности бетона приводят к снижению скорости распространения ультразвуковых волн только в случае, если они пересекают сечение свай, ограниченное осями труб

доступа. Дефекты, расположенные в стороне от данного сечения сваи, могут проявляться на ультразвуковых данных в виде снижения амплитуды сигнала (часто — незначительного).

3. Для увеличения контролируемой области в каждую испытываемую сваю следует устанавливать более двух труб доступа, например, в соответствии с указаниями [15], по одной трубе на каждые 250—300 мм диаметра сваи.

4. Расчет параметра затухания целесообразно выполнять не только для всего зарегистрированного сигнала, но и для интервала времени 0,1 мс (начиная с момента первого вступления волн). Параметр затухания, рассчитанный в пределах временного интервала, характеризует материал сваи в узкой области между трубами доступа; рассчитанный для всего зарегистрированного сигнала — материал всего поперечного сечения.

5. Воздушный зазор между трубой доступа и бетоном приводит к критическому затуханию ультразвуковых волн. Для корректной интерпретации данных аномалий может потребоваться проведение дополнительных полевых измерений по методике межскважинной ультразвуковой томографии. При изготовлении свай следует принимать меры, обеспечивающие непрерывную связь между бетоном и трубами доступа по поверхности их контакта.

6. Пересчет значений скорости распространения ультразвуковых волн в значения прочности материала сваи является некорректным.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки научных школ № НШ 5545.2018.5.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капустин В.В., Хмельницкий А.Ю. Проблемы малоуглубинной сейсморазведки и георадиолокации в составе инженерно-геологических изысканий. Применение волновых методов для неразрушающего контроля фундаментных конструкций / Учеб. пособие. М.: Университетская книга, 2013. 116 с.

2. Капустин В.В., Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Кувалдин А.В. Возможности сейсмоакустических и ультразвуковых методов при контроле качества свайных фундаментов // Геотехника. 2018. Т. 10. № 5—6. С. 62—71.

3. Moran M., Brettmann T., Hertlein B., Meyer M., Whitmire B. Deep Foundations Institute. guideline for interpretation of nondestructive integrity testing of augered cast-in-place and drilled displacement piles. New Jersey, USA: DFI, 2012. P. 39.

4. Amir J.M. Integrity testing. 2015. P. 99.

5. Amir J.M. Discussion of “Reliability evaluation of cross-hole sonic logging for bored pile integrity” by D.Q. Li, L.M. Zhang, W.H. Tang // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2007. V. 133. Iss. 3. P. 342—343. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:3(342)

6. Amir J.M., Amir E.I. Capabilities and limitations of cross hole ultrasonic testing of piles // Proc. Conf. Contemporary topics in deep foundations. Orlando, USA: ASCE GSP 185, 2009. P. 536—543.

7. Chai H.-Y., Phoon K.-K., Zhang D.-J. Effects of the Source on Wave Propagation in Pile Integrity Testing // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2010. V. 136. Iss. 9. P. 1200—1208. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000272

8. Cosic M., Folic B., Folic R. Numerical Simulation of the Pile Integrity Test on Defected Piles // Acta Geotechnica Slovenica. 2014. V. 11. No. 2. P. 5—19.

9. Protopapadakis E., Schauer M., Pierrri E., Doulamis A.D., Stavroulakis G.E., Böhrnsen J.-U., Langer S. A genetically optimized neural classifier applied to numerical pile integrity tests considering concrete piles // Computers & Structures. 2016. V. 162. P. 68—79. DOI: 10.1016/j.compstruc.2015.08.005

10. Ni S.-H., Lo K.-F., Lehmann L., Huang Y.-H. Time-frequency analyses of pile-integrity testing using wavelet transform // Computers and Geotechnics. 2008. V. 35. Iss. 4. P. 600—607. DOI: 10.1016/j.compgeo.2007.09.003

11. Niederleithinger E. Improvement and extension of the parallel seismic method for foundation depth measurement // Soils and Foundations. 2012. V. 52. Iss. 6. P. 1093—1101 DOI: 10.1016/j.sandf.2012.11.023

12. Lee J.-S., Song J.U., Hong W.-T., Yu J.-D. Application of time domain reflectometer for detecting necking defects in bored piles // NDT & E International. 2018. V. 100. P. 132—141. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.09.006

13. Johnson K. R. Analyzing thermal integrity profiling data for drilled shaft evaluation // DFI Journal. 2016. V. 10. No. 1. P. 25—33.

14. Жостков Р.А. Программа для моделирования ультразвуковой дефектоскопии буронабивных свай / Номер гос. регистрации программы для ЭВМ 2018665157. Дата регистрации 14.11.2018. Бюл. 12.

15. ASTM D6760-16. Standard test method for integrity testing of concrete deep foundations by ultrasonic crosshole testing. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2016. P. 8. DOI: 10.1520/D6760-16

16. Мухин А.А., Лозовский И.Н., Чуркин А.А. СТО ЭГЕОС 1-1.1-001-2018. Применение неразрушающего контроля сплошности свай ультразвуковым методом. М., 2018. 22 с.
  17. Likins G.E., Rausche F., Webster K., Klesney A. Defect Analysis for CSL Testing / Proc. of the Geo-Denver: New Peaks in Geotechnics No. 158. Denver, USA: ASCE, 2007. P. 10.
  18. Tian Z., Huo L., Gao W., Li H., Song G. Modeling of the attenuation of stress waves in concrete based on the Rayleigh damping model using time-reversal and PZT transducers // Smart Materials and Structures. 2017. V. 26. No. 10. P. 1—10. DOI: 10.1088/1361-665X/aa80c2
  19. Stojić D., Nestorović T., Marković N., Marjanović M. Experimental and numerical research on damage localization in plate-like concrete structures using hybrid approach // Structural Control and Health Monitoring. 2018. V. 25. Iss. 9. P. 1—19. DOI: 10.1002/stc.2214
  20. Лозовский И.Н., Чуркин А.А. Контроль сплошности буронабивных свай методом межскважинной ультразвуковой томографии // Транспортное строительство. 2018. № 7. С. 6—9.
  21. Болгаров А.Г., Рослов Ю.В. Межскважинная сейсмическая томография для решения инженерно-геологических задач // Технологии сейсморазведки. 2009. № 1. С. 105—112.
-