

УДК 001.891.573,620.179.18

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ СВАИ МЕТОДОМ МЕЖСКВАЖИННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ

© 2020 г. И. Н. Лозовский^{1,2,*}, А. А. Чуркин¹, Р. А. Жостков³

¹Общество с ограниченной ответственностью “ЭГЕОС”, Москва, Россия

²Центр геоэлектромагнитных исследований – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: piles@aigeos.ru

Поступила в редакцию 26.08.2019 г.

После доработки 13.09.2019 г.

Принята к публикации 28.10.2019 г.

Для уточнения методики сбора, обработки и инверсии данных межскважинной ультразвуковой томографии железобетонных свай выполнено численное и физическое моделирование. По результатам исследований восстановлены границы заданных в моделях дефектов. Представленная методика может быть применена для решения практических задач контроля качества железобетонных конструкций.

DOI: 10.31857/S0367676520020222

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения надежности и безопасности возводимых зданий и сооружений их фундаменты должны соответствовать требованиям проектной документации. Межскважинный ультразвуковой метод применяют для контроля качества буронабивных свай и других монолитных железобетонных конструкций, изготовленных в грунте. Метод основан на анализе параметров упругих волн, возбуждаемых и регистрируемых в теле сваи с помощью датчиков, погруженных в установленные в составе арматурного каркаса трубы доступа [1].

Ультразвуковой контроль позволяет выявить зоны нарушения сплошности бетона (включения грунта, бетона пониженной прочности и пр.), установить их верхнюю и нижнюю границы. Однако для принятия решения о возможности использования исследуемой конструкции в составе фундамента часто требуется определить геометрические размеры, местоположение и физические свойства выявленных аномальных зон [2]. С этой целью проводят дополнительные ультразвуковые измерения по методике межскважинной томографии, основанные на многоазимутальном покрытии изучаемой области сейсмическими лучами с использованием встречных веерных систем наблюдений [3–6].

МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Для повышения информативности и надежности контроля качества железобетонных свай методом ультразвуковой томографии, а также уточнения методики сбора, обработки и инверсии данных метода выполнен комплекс исследований с использованием численного и физического моделирования. Исследования продолжают изучение возможностей и ограничений ультразвукового контроля буронабивных свай и “стен в грунте” [7, 8].

В качестве объекта моделирования выбрана бетонная буронабивная свая с двумя зонами нарушения сплошности (дефектами) и семью трубами доступа (рис. 1а). Геометрические размеры дефектов и положение труб доступа выбраны таким образом, чтобы изучить томографическим методом следующие практические случаи: включение материала с пониженной прочностью значительного размера в стволе сваи; дефект значительного размера, расположенный у трубы доступа; два дефекта, пересекающие один профиль наблюдения; дефект, край которого пересекает профиль наблюдения и пр.

Для изготовления физической модели буронабивной сваи стальная бочка диаметром 572 мм и высотой 882 мм была заполнена бетонной смесью

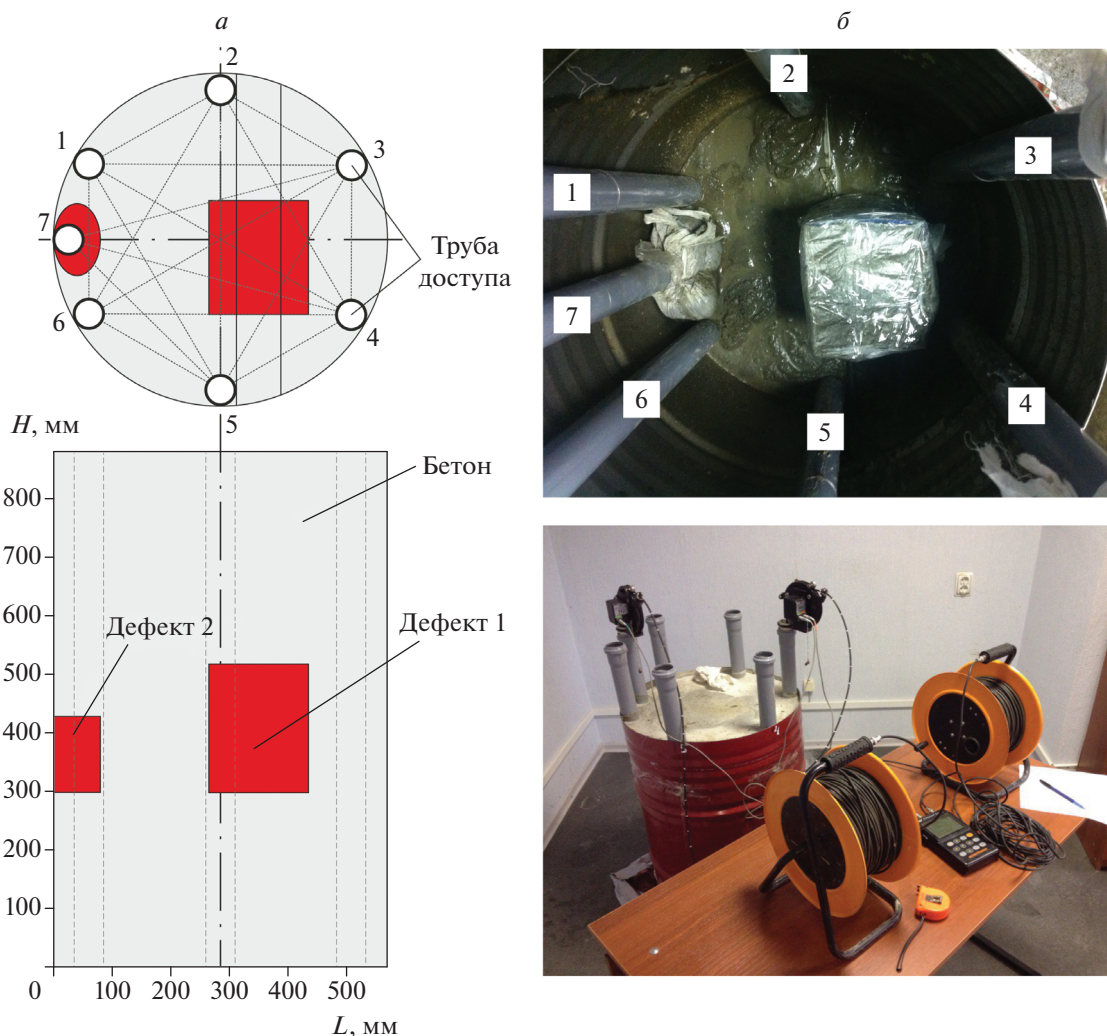


Рис. 1. Физическая модель буронабивной сваи: а – схема модели; б – установка дефектов в модель (сверху, цифрами показаны номера труб доступа) и проведение ультразвуковых измерений (снизу).

(рис. 1б). В качестве каналов доступа использовались пластиковые трубы внутренним диаметром 50 мм и толщиной стенки 3 мм. На расстоянии 300 мм от нижнего конца модели были установлены два дефекта: картонная коробка размером $170 \times 190 \times 220$ мм и примыкающий к трубе доступа пластиковый пакет, заполненные смесью песка с бетонной смесью в соотношении 2 к 1.

Из примененной в модели бетонной смеси и материала дефектов (смесь бетона с песком) были изготовлены образцы в форме кубов со стороной 100 мм (4 из бетона и 2 из материала дефектов). На изготовленных образцах были проведены измерения скорости распространения ультразвуковых волн датчиками сквозного прозвучивания прибора Пульсар-2.2 (НПП «Интерприбор», г. Челябинск, Россия). Скорость ультразвуковых волн в бетоне составила $3500\text{--}3900$ м · с⁻¹, в материале дефектов – $2300\text{--}2700$ м · с⁻¹.

Для уточнения методики сбора и инверсии данных ультразвуковой томографии в программном комплексе COMSOL Multiphysics 5.4 (модули Structural Mechanics и Acoustics, лицензия № 9600341) [9] методом конечных элементов выполнено численное моделирование ультразвуковых измерений на профилях между трубами доступа 1–4 (модель 1) и 2–7 (модель 2).

Физические параметры материалов модели: плотность, скорости распространения продольных и поперечных волн, параметры α и β рэлеевской модели затухания [10, 11] приведены в табл. 1. Для воды также заданы коэффициенты динамической (1 мПа · с) и объемной (3 мПа · с) вязкости.

Источник ультразвуковых колебаний задан в виде прямоугольника со сторонами 50 и 30 мм, на продольных гранях которого задано нормальное смещение (центральная частота импульса – 35 кГц). Заданные точечными приемники регистрируют из-

Таблица 1. Свойства материалов

| Характеристика | Материал | | | | | |
|---|----------------------------|------|------------------------------------|----------------------------|------------------------------|--------|
| | бетон | вода | дефект | сталь | пластик (ПВХ) | воздух |
| Плотность, ρ , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ | 2200 | 1000 | 1500 | 7900 | 1500 | 1.2 |
| Скорость продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ | 3700; 2350 | 1500 | 2500; 800 | 5512; 3200 | 2350; 1125 | 330 |
| Рэлеевская модель затухания. Коэффициенты α , с^{-1} ; β , с | $2 \cdot 10^3$; 10^{-8} | — | $4 \cdot 10^3$; $2 \cdot 10^{-8}$ | $2 \cdot 10^2$; 10^{-9} | 10^3 ; $0.5 \cdot 10^{-8}$ | — |

менение акустического давления в водной среде в зависимости от времени в течение 0.3 мс.

Размер конечных элементов выбран с учетом характерных размеров геометрии модели и длины волны в материале таким образом, чтобы обеспечить ошибку расчета не более 0.5%. Шаг по времени составил 27 нс (в соответствии с критерием Куранта—Фридрихса—Леви).

На первом этапе численного моделирования для обеих моделей были выполнены расчеты, имитирующие ультразвуковые измерения, выполненные по стандартной методике: источник и приемник синхронно поднимают и с шагом 50 мм выполняют возбуждение и регистрацию ультразвуковых сигналов. Для каждого сигнала, зарегистрированного приемником, определены значения времени первого вступления (время, соответствующее первому отклонению значений амплитуды сигнала от равновесного состояния на 1 мПа). Несмотря на принципиально разные геометрические размеры и местоположение дефектов, полученные для двух моделей значения времен первого вступления близки между собой.

На втором этапе численного моделирования проведены расчеты, имитирующие измерения методом межскважинной томографии. Для фиксированного положения источника выполнялась регистрация возбужденного сигнала для всех точек приема. Цикл измерений повторялся для набора положений источника, определяемого шагом измерений (50 мм между соседними точками возбуждения, 25 мм между соседними точками регистрации). Для зарегистрированных сигналов выполнено определение времени первого вступления волн.

Полученные массивы данных (глубины погружения датчиков и соответствующие им времена первого вступления сигнала) были использованы в качестве входных данных для решения обратной задачи (инверсии) по методике двумерной лучевой межскважинной томографии. Инверсия

выполнена в программном комплексе ZondST2D (Zond Software, г. Санкт-Петербург, Россия) [12]. Исследуемая среда была разделена на ячейки размером 20×23 мм. В качестве стартовой модели использовалась однородная среда со скоростью продольных волн $3700 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Инверсия выполнена по методу наименьших квадратов с использованием сглаживающего оператора путем итерационного изменения модели начального приближения таким образом, чтобы минимизировать невязки между входными и рассчитанными данными. В качестве схемы распределения скорости в моделях был выбран способ, реализующий концепцию расширяющегося с глубиной луча. Соотношение степени сглаживания в горизонтальном и вертикальном направлении — 10. Подбор скорости был ограничен диапазоном $1500\text{--}4000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Решения обратной задачи для обеих моделей представлены в виде пространственного распределения значений скорости с рассчитанными лучевыми траекториями и с нанесенными фактически контурами дефектов (рис. 2). На представленных распределениях выделяются низкоскоростные аномальные зоны, границы которых с точностью до первых сантиметров восстанавливают положение заданных в моделях дефектов.

Утвержденная на численных моделях методика проведения измерений и инверсии зарегистрированных данных применена на физической модели. Для сбора данных использован комплект оборудования Пульсар-2.2 ДБС (НПП “Интерприбор”, г. Челябинск, Россия), центральная частота ультразвуковых преобразователей — 35 кГц.

Результаты физического моделирования представлены на рис. 3. Местоположение низкоскоростных аномальных зон с хорошей точностью совпадает с границами дефектов, установленных в физической модели.

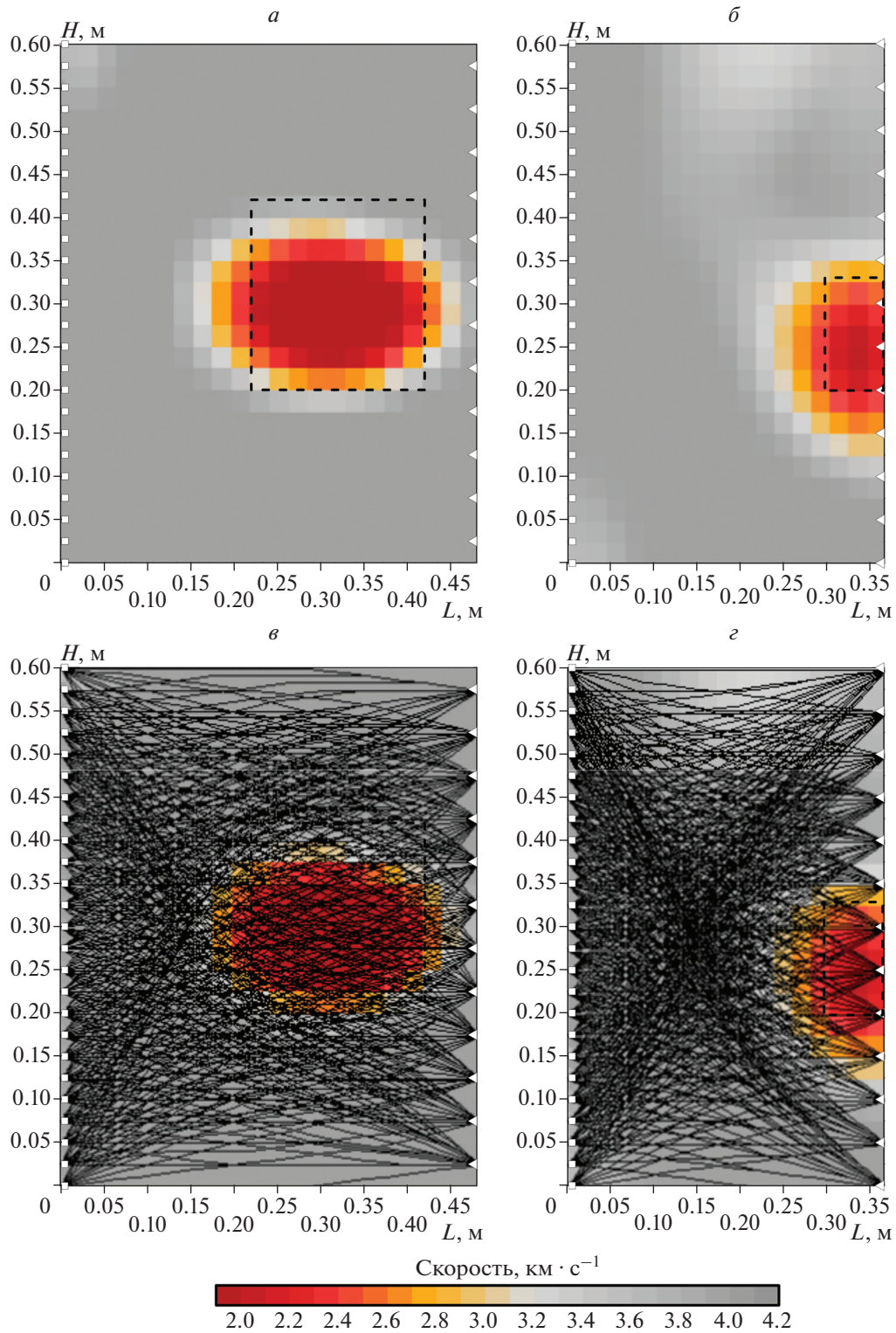


Рис. 2. Результаты решения обратной задачи межскважинной ультразвуковой томографии для массива данных, полученного по данным численного моделирования. Карты распределения значений скорости (*a–г*) с нанесенными лучевыми траекториями (*в, г*). *a, в* – модель 1 (профиль 1–4); *б, г* – модель 2 (профиль 2–7). Пунктирной линией показаны фактические контуры дефектов. Треугольниками показано местоположение источников, квадратами – приемников ультразвуковых волн.

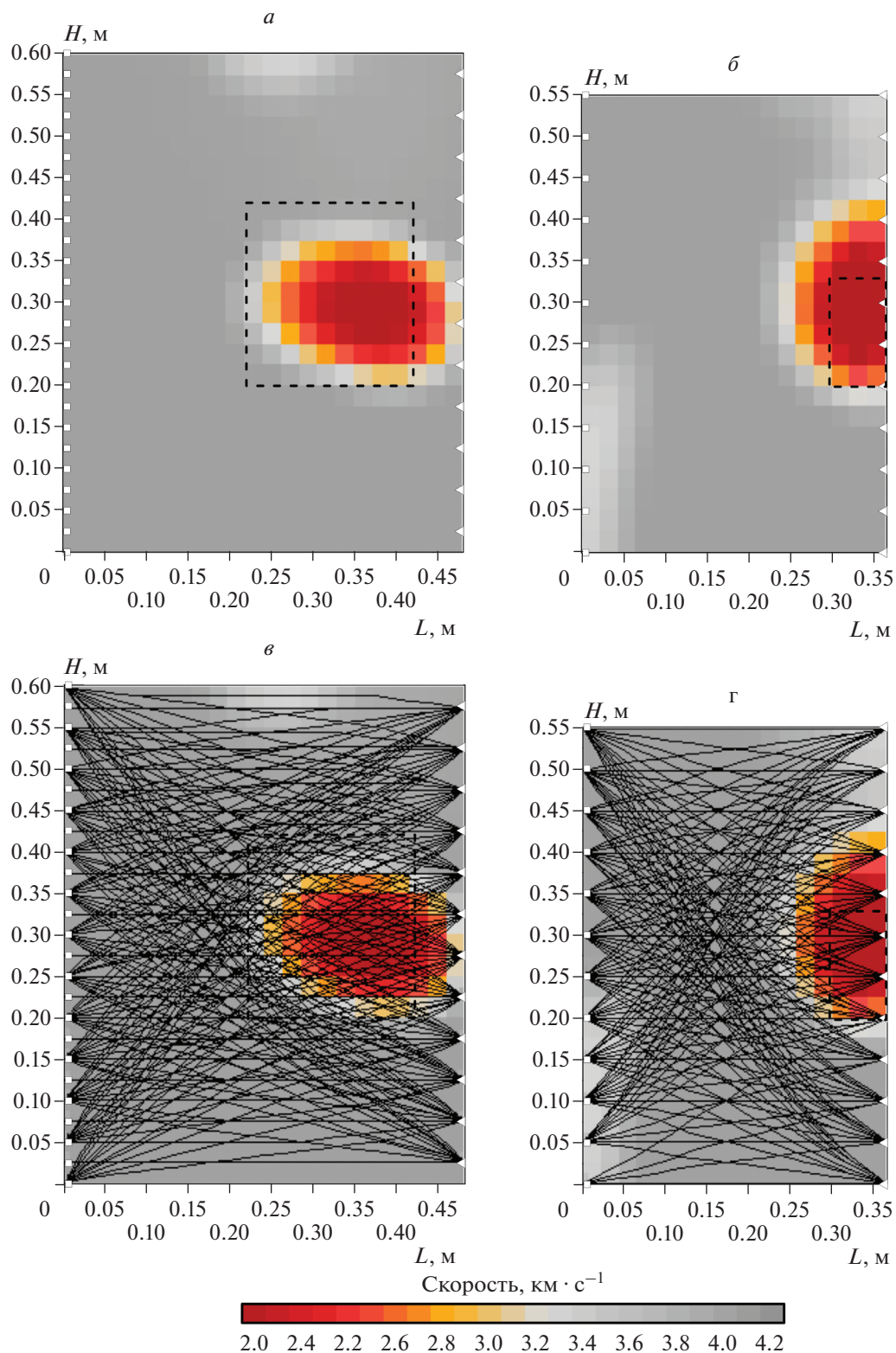


Рис. 3. Результаты решения обратной задачи межскважинной ультразвуковой томографии для массива данных, полученного по измерениям на физической модели. Карты распределения значений скорости (*а–г*) с нанесенными лучевыми траекториями (*в, г*). *а, в* – профиль 1–4; *б, г* – профиль 2–7. Пунктирной линией показаны фактические контуры дефектов. Треугольниками показано местоположение источников, квадратами – приемников ультразвуковых волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты решения обратной задачи межскважинной ультразвуковой томографии для наборов данных, полученных в результате численного и физического моделирования, позволили восстановить геометрические размеры зон нарушения сплошности, заданных в модели буронабивной сваи.

Описанная в статье методика сбора, обработки и инверсии ультразвуковых данных может быть применена для решения практических задач по контролю качества железобетонных конструкций, изготовленных в грунте. Результаты полевых томографических измерений на объектах строительства могут быть использованы проектными организациями для расчета фактического сопротивления ствола свай с выявленными дефектами по материалу и учета влияния дефектов на работоспособность фундамента.

Данные численного моделирования близки к натурным измерениям на физической модели, что позволяет использовать комплекс заданных в численных моделях параметров для дальнейшего изучения разрешающей способности, возможностей и ограничений ультразвукового метода.

К сожалению, нарушение сцепления труб доступа 3 и 6 с бетоном в верхней части физической модели не позволило собрать материал для решения всех поставленных при моделировании задач, в том числе изучения возможностей трехмерной ультразвуковой томографии. Планируется продолжение работ по физическому моделирова-

нию ультразвукового контроля свай с учетом полученного опыта.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для поддержки научных школ (проект № НШ 5545.2018.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Капустин В.В., Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Кувалдин А.В.* // Геотехника. 2018. Т. 10. № 5–6. С. 62.
2. *Лозовский И.Н., Чуркин А.А.* // Трансп. строит. 2018. № 7. С. 6.
3. *Болгаров А.Г., Рослов Ю.В.* // Техн. сейсмразв. 2009. № 1. С. 105.
4. *Ошкин А.Н., Ермаков Р.Ю., Рагозин Н.А., Игнатьев В.И.* // Приб. и сист. разв. геофиз. 2016. Т. 57. № 3. С. 37.
5. *Шишкина М.А., Фокин И.В., Тихоцкий С.А.* // Техн. сейсмразв. 2015. № 1. С. 5.
6. <https://www.piletest.com/papers/Pile%20testing%202015.pdf>.
7. *Amir J.M., Amir E.I.* // Proc. IFCEE. 2009. P. 536.
8. *Niederleithinger E., Amir J. M., Hubner M.* // Proc. SAGEEP. 2010. P. 685.
9. *Жостков Р.А.* Программа для моделирования ультразвуковой дефектоскопии буронабивных свай. Прогр. для ЭВМ № 2018665157. 2018.
10. *Stojić D., Nestorović T., Marković N., Marjanović M.* // Struct Control Health Monit. 2018. V. 25. № 9. Art. № e2214.
11. *Tian Z., Huo L., Gao W. et al.* // Smart Mater. Struct. 2017. V. 26. № 10. Art. № 105030.
12. <http://zond-geo.com/software/seismic/zondst2d/>.