

ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

TRANSPORT CONSTRUCTION

Основан в 1931 г. Выходит 12 раз в год

9/2018

ISSN 0131-4300



Новый порт «Сабетта» на берегу Обской губы
для транспортировки сжиженного газа проекта
«Ямал-СПГ»

МОСТОСТРОЕНИЕ

АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ

ГЕОЭКОЗАЩИТА

Ограничения области применения сейсмоакустического метода контроля сплошности бетона свай

МУХИН А.А., ген. директор, ООО «ЭГЕОС», Москва; ЧУРКИН А.А., инж.-геофизик, ООО «ЭГЕОС», асп. МГУ им. Ломоносова, Москва; ЛОЗОВСКИЙ И.Н., зав. лабораторией ООО «ЭГЕОС», науч. сотр. ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Троицк, Москва

Аннотация

Использование сейсмоакустического метода контроля сплошности бетона свай вне области его применения, обусловленной физическими основами метода, особенностями свайных элементов и инженерно-геологическими условиями, приводит к ложной интерпретации результатов исследований. Представлены основные ограничения метода, проиллюстрированные примерами из производственного опыта ООО «ЭГЕОС».

Ключевые слова

Буронабивные сваи, контроль сплошности свай, неразрушающий контроль, сейсмоакустический метод, фундаменты глубокого заложения

Abstract

The usage of low strain pile integrity testing outside its area of application (which is determined by physical principles of the method, pile design properties and geological conditions) can lead to false data interpretation results. The current publication describes general limitations of the method illustrated with AIGEOS LLC production activity examples.

Keywords

Bored piles, deep foundations, low strain integrity testing, nondestructive testing, pile integrity testing

Нарушение технологии производства свайных работ, несоответствие качества применяемых материалов и конструкций приводят к дефектам (нарушениям сплошности бетона) свайных элементов [8]. Для оценки качества свай при устройстве свайных фундаментов нормативными документами [2, 3] предусматривается применение разрушающих и неразрушающих методов контроля. В качестве неразрушающих методов контроля устанавливают применение ультразвукового и сейсмоакустического методов, без указаний по выбору метода испытаний в зависимости от особенностей проекта свайного фундамента.

Основополагающим международно признанным документом, регламентирующим контроль сплошности свай сейсмоакустическим методом, является стандарт ASTM D5882 [1]. Он определяет методику проведения испытаний, требования к применяемым техническим средствам и основные подходы к интерпретации результатов. Для развития, уточнения положений стандарта в зарубежной практике широко применяются документы рекомендательного характера [6, 7]. ООО «ЭГЕОС» был разработан стандарт организации СТО ЭГЕОС [4], представляющий собой документ технического регулирования, учитывающий собственный опыт применения сейсмоакустического метода контроля качества свай, отечественный и зарубежный опыт.

Сейсмоакустический метод обладает рядом достоинств: возможностью контроля любой произвольно выбранной сваи в составе свайного поля, высокой производительностью, минимальными затратами по подготовке свай к испытаниям. Однако метод не универсален и имеет ряд ограничений в области применения, которые необходимо учитывать как при планировании испытаний, так и в процессе анализа их результатов. Использование метода без учета особенностей проекта и области применения может приводить к ошибочной интерпретации результатов [5].

Теоретические основы и методика сейсмоакустического контроля качества свай

Сейсмоакустический метод контроля сплошности свай основан на анализе прохождения и отражения в исследуемой конструкции акустических волн. Возбуждение упругой волны происходит в результате удара молотка с известным весом и материалом бойка по оголовку сваи в направлении, параллельном оси сваи. От подошвы сваи и не-

однородностей в ее теле (изменений поперечного сечения сваи, разрывов ствола, инородных включений в стволе и пр.) возникают отраженные волны, которые распространяются в обратном направлении к оголовку сваи (рис. 1, 2). Регистрация акустических волн производится высокочувствительным датчиком (акселерометром или велосиметром), устанавливаемым на оголовке сваи.

В качестве физической модели, лежащей в основе метода испытаний, используется теория распространения продольной деформации в свободно расположенных тонких линейно-упругих стержнях постоянного сечения. Для соответствия исследуемой сваи модели тонкого стержня необходимо выполнение двух основных условий:

$$D/L \ll 1 \text{ и } D/\lambda \ll 1,$$

где D – диаметр сваи (сторона квадратного сечения); L – длина сваи; λ – длина волны волнового импульса, возбуждаемого ударным источником [5].

В качестве параметра, характеризующего волновое сопротивление поперечного сечения сваи, вовлеченного в колебательный процесс, используется акустический импеданс $Z = \rho \cdot V \cdot S$, где $\rho \cdot V$ – акустическая жесткость; ρ – плотность материала сваи; V – стержневая скорость упругой волны в теле сваи; S – площадь поперечного сечения сваи. На границах, разделяющих участки сваи с различными значениями акустического импеданса, образуются отраженные волны. Чем больше изменение акустического импеданса, тем выше энергия отраженной от границы волны.

Длина сваи и локализация акустических аномалий по глубине определяется по формуле

$$L = (v \cdot \Delta t) / 2,$$

где L – расстояние от оголовка сваи до отражающей границы; $v = \sqrt{E/\rho}$ – скорость распространения упругой волны в теле сваи (E – модуль Юнга, ρ – плотность материала сваи); Δt – интервальное время пробега отраженной волны.

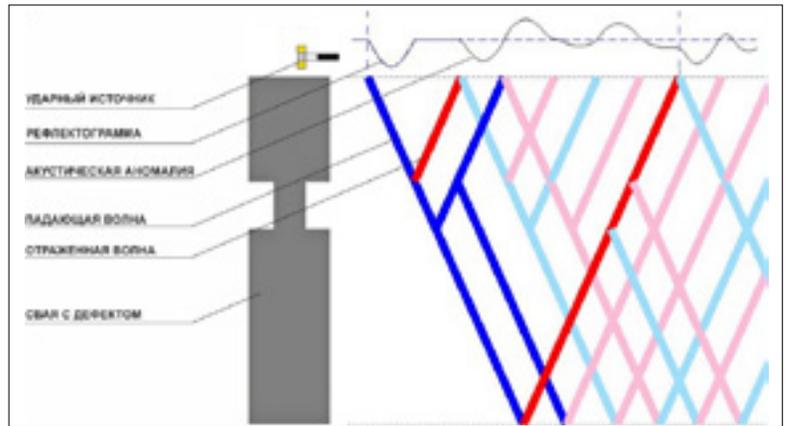


Рис. 1. Принцип контроля сплошности свай сейсмоакустическим методом

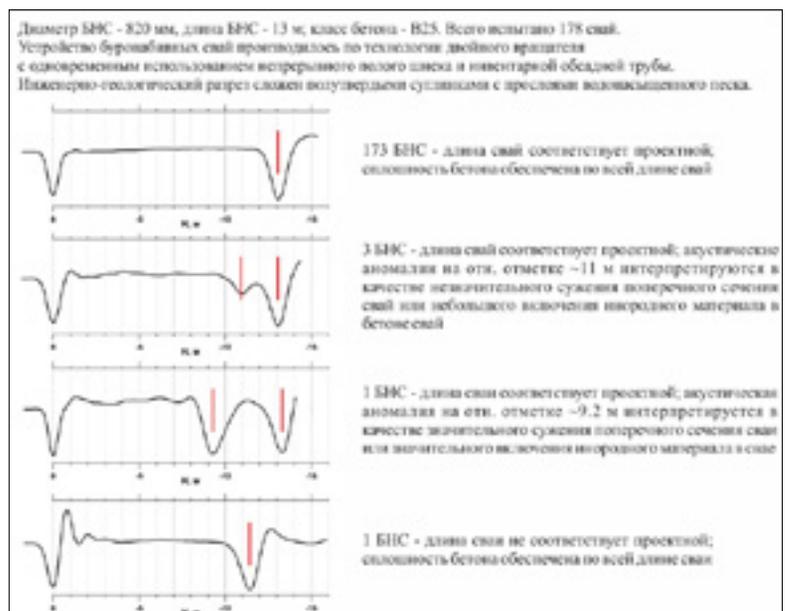


Рис. 2. Пример успешного применения метода для контроля качества свайного фундамента из 178 свай (использованы полевые материалы ООО «ЭГЕОС»)

Скорость волны в свае предполагается постоянной и принимается по данным градуировочных зависимостей с учетом априорной информации или определяется по измерениям на эталонных сваях. Точность определения значения скорости непосредственно влияет на качество выводов о длине и сплошности сваи.

Неоднозначность интерпретации результатов, полученных по данному методу, возрастает тем больше, чем значительнее параметры исследуемой сваи и характеристики вмещающих ее грунтов отличаются от теоретической модели. Для приближения к модели тонкого стержня может применяться разночастотное возбуждение сигнала с использованием нескольких ударных

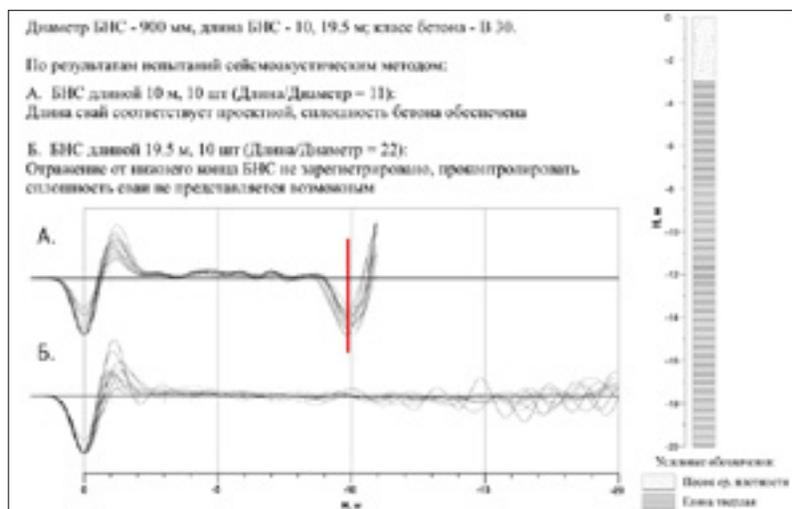


Рис. 3. Результаты применения сейсмоакустического метода для свай длиной 10,0 и 19,5 м, изготовленных в твердых глинах на одном объекте строительства (использованы полевые материалы ООО «ЭГЕОС»)

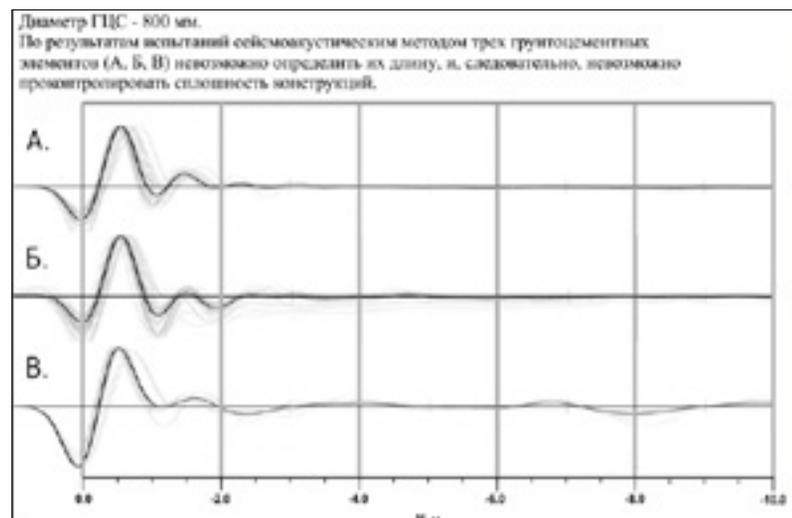


Рис. 4. Результат применения сейсмоакустического метода для контроля сплошности грунтоцементных элементов (использованы полевые материалы ООО «ЭГЕОС»)

источников различного веса и с различным материалом бойка [5].

Возможности метода

Метод испытаний позволяет определить длину сваи в случае, когда на зарегистрированных сигналах можно надежно выделить отражение от нижнего конца сваи. Точность определения длины свай по данным метода оценивается в $\pm 10\%$ и в первую очередь зависит от точности выбора значения средней скорости распространения волн в теле сваи [1, 6, 7].

По данным сейсмоакустического метода возможно обнаружить и локализовать по глубине

не резкие изменения поперечного сечения сваи и значительные включения инородного материала (акустическая жесткость которого значительно отличается от акустической жесткости бетона), составляющие не менее $\pm 25\%$ от площади сечения сваи, а также поперечные трещины и места соединения отдельных секций составных свай [1, 6, 7].

Ограничения метода

Метод испытаний обладает рядом ограничений применения, обусловленных как используемой физической моделью тонкого стержня, так и свойствами вмещающих свайный фундамент грунтов. Представленные ограничения области применения метода должны учитываться как на этапе планирования испытаний свай, так и на этапе интерпретации результатов исследований.

1. В случае повышенных значений акустической жесткости вмещающей среды (скальные грунты, твердые глины и др.) и/или повышенных значений отношения D/L испытываемой сваи (D – диаметр сваи, L – длина сваи) не всегда возможны выделение отражения от нижнего конца сваи и контроль сплошности бетона сваи.

Свая взаимодействует с вмещающей грунтовой средой не только своим торцом, но и боковой поверх-

ностью ствола, что приводит к потере энергии возбужденного импульса на преодоление бокового трения (излучение во вмещающую среду) и, следовательно, к снижению амплитуды отраженных волн. В случае, когда мощность полезного сигнала приближается к мощности шума, надежное выделение отражений от нижнего конца сваи и неоднородностей материала сваи обеспечивается не всегда.

Чем выше значения акустической жесткости вмещающих грунтов и чем больше отношение длина/диаметр сваи, тем значительно ниже амплитуды отраженных волн (рис. 3). Метод,

как правило, не позволяет определить длину и контролировать сплошность свай, если отношение длина/диаметр сваи превышает 10 в грунтах с повышенным значением акустической жесткости, таких как твердые глины, скальные грунты и др. или 40 в грунтах с низким значением акустической жесткости, таких как рыхлый песок, легкие глины и суглинки и др. [6, 7].

2. Метод испытаний не позволяет контролировать длину и сплошность свай, изготовленных с применением напорного бетонирования в неустойчивых неоднородных грунтах.

К данной категории могут быть отнесены сваи буроинъекционные, изготовленные по технологии «полого шнека» (CFA), Fundex, DDS, грунтоцементные сваи (ГЦС), сооружаемые по технологии Jet grouting, а также сваи, изготовленные по разрядно-импульсной технологии.

Сваи данных типов не удовлетворяют физической модели метода. Изменения формы свай в зависимости от геологического разреза и неоднородность свойств материала ГЦС приводят к регистрации большого числа отраженных волн, снижающих надежность интерпретации данных. Пример неудачного использования метода для контроля сплошности грунтоцементных элементов приведен на рис. 4.

3. В большинстве случаев метод испытаний не позволяет определить сплошность сваи ниже первой значительной акустической аномалии.

Часть энергии возбужденного в свае импульса тратится на образование отраженных волн от «верхней» аномалии, что приводит к снижению амплитуды волн, распространяющихся ниже, и, соответственно, волн, отраженных от расположенных ниже аномалий и от конца сваи. Кратные волны от вышерасположенных аномалий дополнительно затрудняют интерпретацию зарегистрированных сигналов. Данное ограничение наглядно проиллюстрировано на рис. 5: значительное нарушение сплошности, обнаруженное

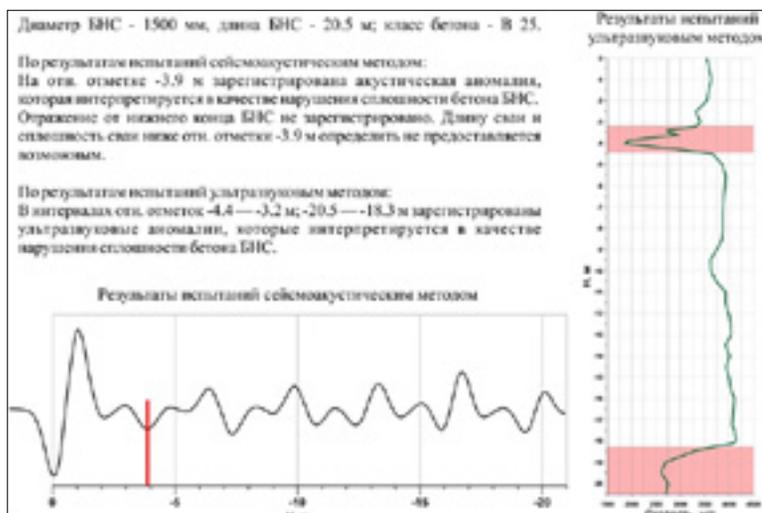


Рис. 5. Совместное применение сейсмоакустического и ультразвукового контроля сплошности для сваи с нарушениями сплошности в верхней и нижней частях ствола (использованы полевые материалы ООО «ЭГЕОС»)

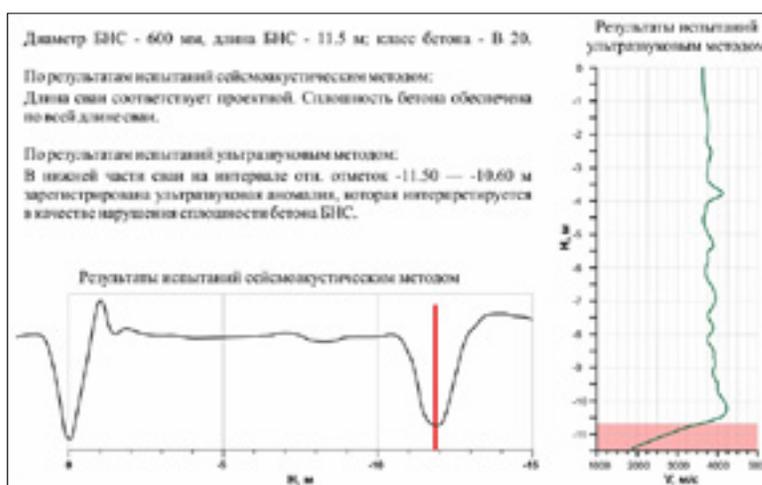


Рис. 6. Дефект в области нижнего конца сваи, выделенный по данным ультразвукового метода, не проявляется на данных сейсмоакустического метода (использованы полевые материалы ООО «ЭГЕОС»)

ультразвуковым методом в нижней части сваи, не было выявлено сейсмоакустическим методом.

3.1. Метод испытаний не позволяет определить длину составных свай и позволяет контролировать их сплошность до первого стыка между секциями.

Стык между секциями является контрастной границей, в акустическом отношении зрения идентичной разрыву ствола сваи, в связи с чем на зарегистрированных сигналах затруднено выделение отражения от нижнего конца составной сваи.

4. Метод испытаний, как правило, не позволяет достоверно судить о качестве бетона в области нижнего конца сваи (на участке в пределах ~ 10% длины сваи).

Данное ограничение (рис. 6) обусловлено точностью определения длины сваи и невозможностью установить, отражается волна от нижнего конца сваи или от нарушения сплошности на данном участке (например, шламового слоя).

4.1. Метод не рекомендуется применять для контроля качества свай-стоек.

При испытаниях свай-стоек особо важен контроль качества материала в области нижнего конца сваи, что затруднено по данным сейсмоакустического метода. В случае, если сплошность сваи обеспечена по всей длине, но свая опирается на грунты с высокими значениями акустической жесткости (например, скальные грунты), отражение от нижнего конца сваи может быть не зарегистрировано. Чем ближе значение акустической жесткости материала сваи к акустической жесткости грунта в основании сваи, тем меньше амплитуда волны, отраженной от нижнего конца сваи.

5. Метод испытаний не позволяет выявить нарушения сплошности в верхней части сваи (на участке ~ 1–2 м или ~ 2–3 диаметра сваи в зависимости от того, какое значение больше).

Регистрируемый на начальном временном отрезке сигнала высокоамплитудный импульс, вызванный воздействием ударного источника на оголовок сваи, не позволяет выделить импульсы от отраженных волн на данном временном отрезке. Длина временного отрезка в первую очередь зависит от частоты колебаний, возбуждаемых в теле конструкции.

6. Метод испытаний не позволяет сделать выводы о природе выявленных нарушений сплошности, определить их геометрические размеры и физические свойства, локализовать в пределах сечения сваи.

Такие ограничения следуют непосредственно из теоретической основы метода – отраженные волны возникают в теле сваи при наличии контрастных изменений акустического импеданса конструкции, которые могут быть связаны как с изменением упругих свойств материала, так и геометрических размеров конструкции. Таким образом, каждая зарегистрированная аномалия может быть вызвана одной из большого количества неоднородностей, эквивалентных по акустическому импедансу.

Выводы

1. Область применения сейсмоакустического метода контроля качества свай ограничена конструктивно-технологическими особенностями свайных элементов и инженерно-геологическими условиями площадки.

2. Проектная документация на свайные фундаменты при необходимости должна включать указания по методам неразрушающего контроля качества свай в конкретных условиях выполнения работ.

3. К проведению испытаний следует привлекать обученных специалистов, владеющих методикой проведения работ, обработки и интерпретации результатов и обладающих необходимыми знаниями в теории распространения волн, технологии изготовления свай и инженерной геологии.

4. Не рекомендуется выполнять сейсмоакустическим методом испытания буронабивных свай-стоек, буронабивных свай, изготавливаемых с применением напорного бетонирования (CFA, Fundex, DDS) в неустойчивых неоднородных грунтах, грунтоцементных элементов и др.

Литература

1. ASTM D5882–16. *Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. – Режим доступа: <https://www.astm.org/Standards/D5882.htm>
2. СП 45.13330.2017. *Земляные сооружения, основания и фундаменты*.
3. СП 46.13330.2012. *Мосты и трубы*.
4. СТО ЭГЕОС 1–1.2–001–2017. *Применение неразрушающего контроля сплошности свай сейсмоакустическим методом*. – М., 2017.
5. 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.
6. Amir J. M. *Integrity Testing [Электронный ресурс]*. – 2nd edition. – 2015. – С. 7–56. – Режим доступа: <https://www.piletest.com/papers/Pile%20testing%202015.pdf>
7. Deep Foundations Institute. *Guideline for Interpretation of Nondestructive Integrity Testing of Augered Cast-in-Place and Drilled Displacement Piles / Prepared by Augered Cast-In-Place Pile Committee of Deep Foundations Institute*. – 2012.
8. *Piling Engineering / Ken Fleming [et al.]*. – 3rd edition. – CRC Press, 2008.

Для связи с авторами:

Чуркин Алексей Андреевич, 8 (495) 232-55-52,
доб. 174, piles@aigeos.ru