



## ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ СВАЙ

**АННОТАЦИЯ.** В данной публикации рассматриваются способы решения инженерной задачи по определению длины свай различных конструкций. Предлагаемые способы построены на основе волновых методов - акустических и георадарных. Сочетание поверхностных и скважинных наблюдений позволяет решать данную инженерную задачу для свай различных конструкций.

В практике проектно-изыскательских и строительных работ часто возникает задача, связанная с определением длины свай и свайных конструкций. Подобная ситуация возникает, в частности, при проведении контроля качества строительных работ и обследовании существующих сооружений. В тех случаях, когда применение методов вскрытия и буровых методов по техническим причинам невозможно, требуются дистанционные методы решения данной инженерной задачи.

Для решения задачи определения длины сваи преимущественно используются способы, основанные на применении волновых методов. Проводимые наблюдения заключаются в изучении распространения акустических или электромагнитных колебаний в системе свая - грунт. В настоящее время в практике инженерных работ применяются следующие способы определения длины свай (рис. 1):

1) возбуждение и регистрация на поверхности сваи акустических волн (см. рис. 1, а);

возбуждение и регистрация на поверхности сваи электромагнитных волн (см. рис. 1, а);

2) возбуждение акустических волн на поверхности сваи и регистрация проходящих волн в параллельно пробуренной скважине (см. рис. 1, б);

возбуждение электромагнитных волн на поверхности сваи и регистрация проходящих волн в параллельно пробуренной скважине (см. рис. 1, б);

3) возбуждение и регистрация "направляемых" акустических волн в параллельно пробуренной скважине (см. рис. 1, в);

возбуждение и регистрация электромагнитных волн в параллельно пробуренной скважине (см. рис. 1, в).

**ABSTRACT.** This publication discusses ways to address the engineering challenges in determining the length of piles of various designs. The proposed methods are based on acoustic-wave and radar techniques. The combination of surface and borehole observations allow to solve this engineering problem for piles of various designs.

*Способ, основанный на возбуждении и регистрации акустических волн на поверхности сваи и носящий название в зарубежной литературе "Sonic integrity testing", может применяться не только для определения длины сваи, но и для оценки прочностных характеристик сваи, наличия дефектов и т. п. Применение данного способа для определения длины сваи имеет целый ряд ограничений:*

- скорость в свае предполагается постоянной и заранее известной;
- свая должна иметь постоянное сечение;
- свая должна иметь относительно малое излучение во вмещающий грунт;
- вмещающий грунт должен иметь достаточно однородное строение.

При соблюдении указанных требований длина сваи определяется по известной зависимости:

$$h = \frac{V \cdot \Delta t}{2},$$

где  $V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  стержневая скорость продольной волны в свае ( $\rho$  - плотность материала сваи,  $E$  - модуль Юнга);  $\Delta t$  - интервальное время пробега отражённой от конца сваи волны.

Для случая, когда свая и вмещающий грунт могут быть описаны моделью однородной и изотропной среды, ошибка определения длины сваи данным способом зависит от точности измерения интервального времени пробега отражённой волны и ошибки определения стержневой скорости (рис. 2).

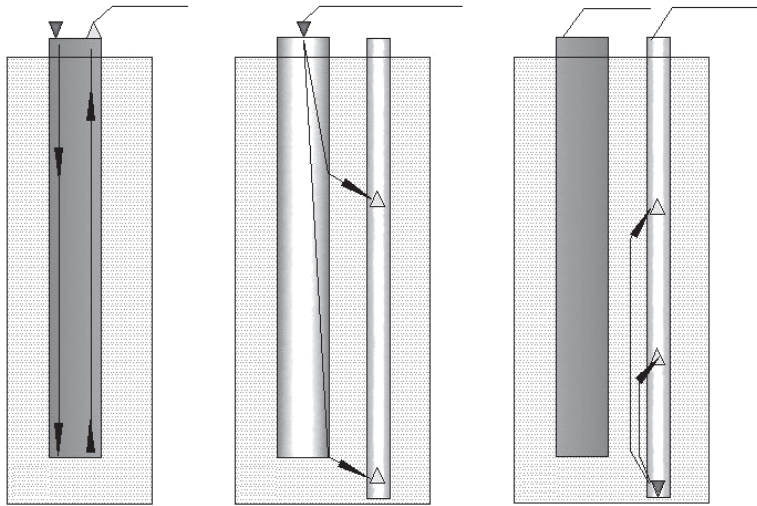


Рис. 1.

Однако на практике подобные условия практически не выполняются, и в результате возникают дополнительные ошибки, связанные с увеличением интервального времени пробега продольной волны при усложнении формы сваи, с наличием дополнительных отражений от неоднородностей в теле сваи и во вмещающем грунте, с низким значением амплитуды отражённой от конца сваи волны при интенсивном излучении в грунт. Таким образом, использование данного способа возможно для однородных свай, находящихся в достаточно простых грунтовых условиях. В соответствии с экспериментальными данными точность определения длины сваи этим методом оценивается в  $\sim 10\%$ . В ряде случаев точность и надёжность определения длины сваи могут быть улучшены с помощью ряда методических приёмов. В частности, повысить точность определения стержневой скорости можно в случае, когда известно положение во вмещающем грунте контрастных границ, отражения от которых фиксируются. Повышению точности и надёжности интерпретации способствует также использование результатов численного моделирования [2].

В случае, когда свая имеет сильно выраженные волноводные свойства ( $\rho_{св} V_{св} \gg \rho_{грунт} V_{грунт}$ ), для определения длины сваи могут использоваться спектральные характеристики сигнала в свае. Когда известна скорость в бетоне, полученная, например, в результате ультразвуковых измерений, можно оценить глубину сваи, определяя частоты резонансных максимумов низших мод. Из теории распространения продольных волн в тонких стержнях известно, что интервал следования резонансных максимумов примерно определяется следующим выражением:

$$f(n) = \frac{V_{стерж} \cdot n}{2l},$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $l$  - длина сваи.

Максимумы, располагающиеся вне данной последовательности, могут быть обусловлены отражениями от неоднородностей в теле сваи или вблизи нее. Более подробное изложение возможностей данного способа приведено в работах [1, 3, 6].

В тех ситуациях, когда отражённый от конца сваи сигнал надёжно не определяется, может быть использован второй способ - возбуждение акустических волн на поверхности сваи и регистрация проходящих волн в параллельно пробуренной скважине (рис. 3). Данный способ в зарубежной литературе получил название "параллельный метод" (Parallel seismic method) [7].

Проходящая волна, возбуждаемая в оголовке сваи, регистрируется в скважине в первых вступлениях. Положение точек на годографе первых вступлений может быть определено из выражений:

$$t_a = \frac{S_1}{V_1} + \frac{S_2}{V_2}; \quad t_b = \frac{S_3}{V_1} + \frac{S_4}{V_2},$$

где  $S_1, S_3$  - путь, пройденный волной в свае;  $S_2, S_4$  - путь, пройденный волной в грунте;  $V_1$  - скорость волны в свае;  $V_2$  - скорость волны в грунте.

Скорости распространения акустической волны в свае и в грунте могут быть найдены по наклонам годографа первых вступлений. Глубина сваи может быть определена по координатам точки излома годографов. Область применения данного способа также ограничена целым рядом условий, в частности, контрастностью акустических жёсткостей сваи и грунта, степенью их однородности, параллельностью оси скважины и оси сваи и т. п. Ошибки, возникающие при отклонении оси скважины от сваи, подробно рассмотрены в работе [7]. Использование при интерпретации синтетических сейсмограмм [8] и результатов численного решения динамической задачи [9] может в ряде случаев обеспечить более точное решение задачи. Точность определения длины сваи "параллельным" методом оценивается в 5%.

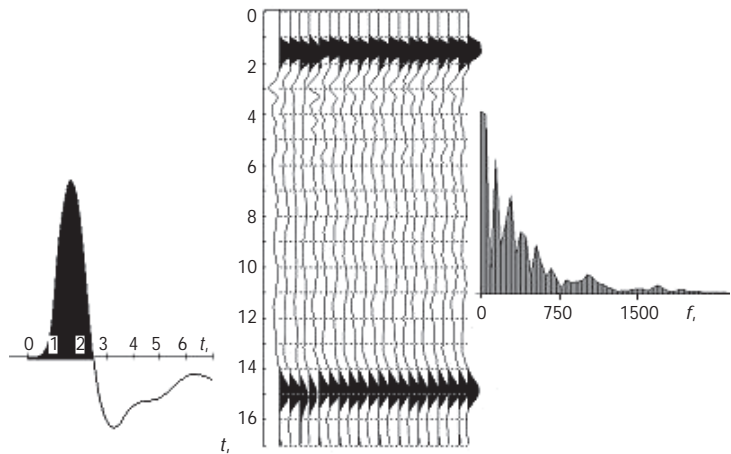


Рис. 2.

Следующий способ [3] основан на свойствах волн, распространяющихся вдоль направляющей системы - *возбуждение и регистрация "направляемых" акустических волн в параллельно пробуренной скважине*. "Направляемые" волны, распространяясь вдоль направляющей системы, испытывают отражения от неоднородностей, встречающихся на пути их следования. Для решения задачи по определению длины сваи могут применяться наблюдения гидроволн, распространяющихся вдоль водонаполненной сваи и возбуждаемых электроискровым источником. Измерения могут проводиться по двум методикам:

- при расположении источника на забое или устье скважины и перемещении приёмника вдоль оси скважины;
- при расположении источника и приёмника на фиксированном расстоянии и перемещении всей установки вдоль скважины.

Гидроволны, имеющие длину 1,0 - 2,0 м, в пределах данных расстояний реагируют на присутствии различных неоднородностей с образованием отражённых гидроволн. В частности, наблюдается отражение от конца сваи гидроволны, распространяющейся вдоль скважины, расположенной параллельно свае (рис. 4).

Преимуществом данного способа является то, что в этом случае можно снять условия постоянства скорости в свае и во вмещающем грунте. Точность определения длины сваи обеспечивается в основном точностью оценки геометрии расположения источника и приёмника относительно сваи.

Акустические методы могут быть применены не только для определения длины железобетонных свай, но и бетонных, каменных и металлических линейно протяжённых конструкций, значительно отличающихся по своим свойствам от вмещающего грунта (рис. 5).

Приведённый пример показывает, что при высокой контрастности акустических жёсткостей грунта и металлической конструкции имеется возможность определения длины сваи как по интервальному времени пробега отражённой волны, так и по амплитудному спектру сигнала.

Методы, основанные на возбуждении и регистрации электромагнитных волн мегагерцового диапазона (георадарные методы), также относятся к волновым методам и могут быть применены для решения задачи определения длины свай. Особенности, отличающие их от акустических методов, определяются в основном способом возбуждения и регистрации электромагнитных волн. В соответствии с приведённой выше классификацией способов измерения длины свай к поверхностным методам могут быть отнесены следующие два способа: (антенной георадара [4] и способ импульсной рефлектометрии [5]) *возбуждение и регистрация на поверхности сваи электромагнитных волн и возбуждение и регистрация электромагнитных волн в параллельно пробуренной скважине*.

При прохождении антенны георадара вблизи оголовка сваи возникают условия образования "направляемой" волны, распространяющейся вдоль сваи (рис. 6)

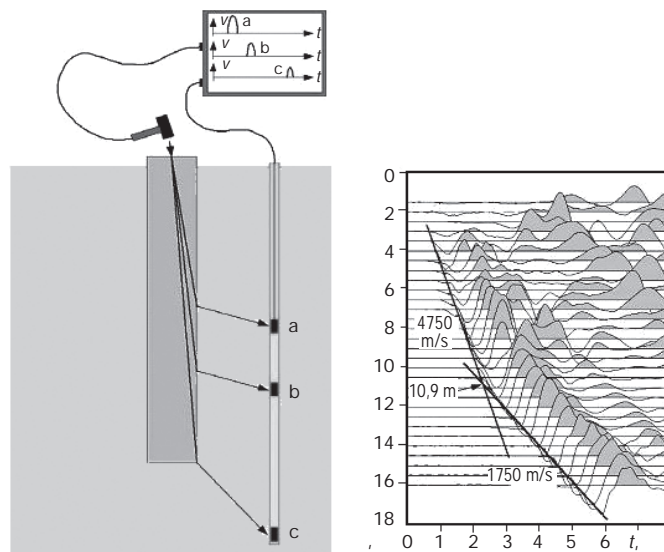


Рис. 3.

Интерпретация материалов, получаемых данным способом, к сожалению, пока недостаточно отработана, и данный способ довольно редко применяется на практике.

Использование способа импульсной рефлектометрии основано на аппаратуре и методике, используемых для поиска обрывов в кабельных линиях. Железобетонную сваю можно рассматривать как приближённую модель коаксиальной линии: арматура - внутренний проводник,

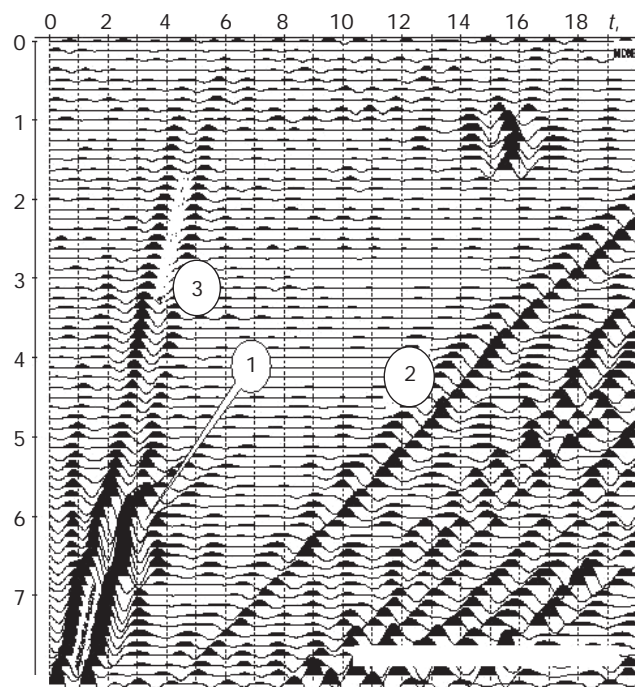


Рис. 4.

1 ; 2 ; 3



По аналогии с акустическими методами могут быть проведены измерения при расположении источника на свае и наблюдении в параллельной скважине. Однако подобный способ с использованием электромагнитных волн на практике не применяется.

При проведении георадарных наблюдений в параллельно пробуренной скважине длина сваи определяется по наблюдению отражений от сваи и дифракции на конце сваи (рис. 8).

Использование комплекса акустических и электромагнитных методов в сочетании с наземной и скважинной техникой измерений позволяет повысить надёжность и точность решения задачи определения длины сваи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Капустин В. В., 2008, Применение сейсмических и акустических технологий при исследовании состояния подземных строительных конструкций: Технологии сейсморазведки, **1**, 91 - 99.
2. Капустин В. В., 2008, Методика изучения особенностей распространения акустических волн в бетонных сваях с использо-

ванием методов численного моделирования: Вестн. Московского университета, Сер. 4, Геология, **3**, 65 - 70.

3. Капустин В. В., 2008, Акустические методы контроля качества свайных фундаментных конструкций: Разведка и охрана недр, **12**.

4. Старовойтов А. В., 2008, Интерпретация георадиолокационных данных: М., изд-во Московского университета.

5. *Технические рекомендации по определению глубины погружения свай в грунт импульсным методом*: М., 1999.

6. Черняков А. В., Богомолова О. В., Капустин В. В., Владов М. Л., Калинин В. В., 2008, Контроль качества геотехнических конструкций, созданных методом струйной цементации: Технологии сейсморазведки, **3**, 97 - 103.

7. Niederleithinger E., Taffe A., & Fechner, T., 2005, Improved Parallel Seismic Technique for Foundation Assessment: SAGEEP 2005, Extended Abstracts: Atlanta, USA.

8. Niederleithinger E., 2008, Numerical simulation of low strain dynamic pile tests. Proceedings of Stresswave: Lisbon.

9. Schubert F., Kohler B., & Pfeiffer A., 2001, Time Domain Modeling of Axisymmetric Wave Propagation in Isotropic Elastic Media with CEFIT – Cylindrical Elastodynamic Finite Integration Technique: Journal of Computational Acoustics, Vol. **9**, No. **3**, 1127 - 1146.

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

*Владимир Викторович КАПУСТИН* - начальник геофизического отдела ООО “ИнжСтройИзыскания”, кандидат физ.-мат. наук.