

УДК 531(007)

Д.Л. Нерадовский

Нерадовский Денис Леонидович родился в 1979 г., окончил в 2002 г. Архангельский государственный технический университет, ассистент кафедры эксплуатации автомобилей и машин лесного комплекса АГТУ. Имеет 2 печатные работы в области строительства и реконструкции зданий.



ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДЛИНЫ СВАЙ

Изложены основные направления зарубежных научных исследований по определению длины свай и дефектов в строительных конструкциях. Предложены иные сферы применения метода неразрушающего контроля.

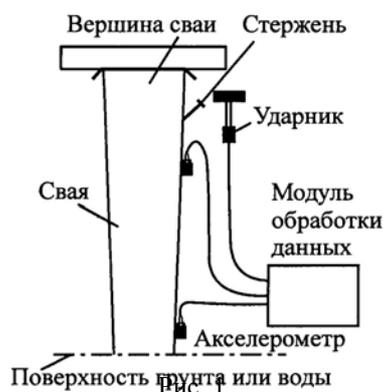
Ключевые слова: свая, методика, ударная волна, резонанс, амплитуда, колебания, акселерометр, фильтр.

Информация о длине свай необходима при определении несущей способности мостов, зданий и сооружений. Рассматриваемый неразрушающий метод основан на продольном распространении ударных волн. Для его оценки были отобраны сваи в различных сооружениях [1]. Их длину находили с помощью волн напряжений. Точность определения длин деревянных свай в интервале от 20 до 60 футов составила 15 %, что делает данный метод пригодным для использования на практике.

Еще в 1994 г. А. Дж. Девис [3] рассмотрел применение звукового эха и ударного метода. Метод звукового эха основан на возбуждении волн ударником и измерении времени, необходимого для их возврата к месту, где установлен акселерометр. А. Девис обратил внимание на ряд проблем, возникающих при использовании данного метода: рассеивание и многократное отражение эха, чувствительность к месту и способу размещения акселерометра, возможность сообщения удара по вершине сваи (обычно к ней нет доступа).

В 1993 г. Р.А. Дуглас и Дж. Д. Хольт [4] проанализировали распространение волн в сваях для определения их длины. Спектр волны достаточно широк, поэтому на разных частотах коэффициент затухания весьма сильно различается, к тому же на затухание влияет внутренняя геометрия. Данным методом была определена длина 26 свай с точностью $\pm 10\%$.

Суть метода, предложенного Р.В. Энтони и Э.К. Пенди [1], заключается в том, что определение длины деревянных свай основано на продольном распространении ударных волн. Волна, возбуждаемая ударом молотка, проходит вдоль сваи и многократно отражается от всех граничных поверхностей до полного затухания. Скорость распространения зависит от плотности материала сваи, его качества и инородных включений.



Длина сваи может быть определена по времени, необходимому для перемещения волны от места удара до конца сваи и обратно. Время отражения связано с ее резонансной частотой. Измерив время распространения ударной волны и отражения (или резонансную частоту), можно определить ее длину. Описанный метод приведен на рис. 1. При его использовании необходимы: средство для возбуждения колебаний (ударник), акселерометр для фиксирования прохождения волн, устройство для сбора и анализа данных. Важно, чтобы направление распространения ударной волны максимально совпадало с продольной осью сваи.

Удар по вершине сваи наиболее предпочтителен для индуцирования распространения ударной волны. Тем не менее доступ к вершине обычно затруднен или невозможен. Эту проблему решают, забивая около вершины сваи стальной стрежень под углом 45° (если свая деревянная), что позволяет возбудить колебания без интерференции от балок и других элементов конструкции моста, находящихся рядом с вершиной сваи.

Ударная волна проходит по свае и отражается от ее нижнего конца. Анализируя данные, полученные от двух датчиков, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга, можно определить скорость ее распространения. Длину сваи вычисляют по скорости волны и времени отражения (прохождения вдоль сваи от места удара и возврата). Величина, обратная времени отражения, – резонансная частота сваи, которая связана с длиной сваи и скоростью волны.

При апробации описанного метода была определена длина 33 свай различных мостов, расположенных в четырех штатах США. В таблице представлен список свай (штат, возраст, состояние). Их длину определяли методом распространения ударных волн, а затем сравнивали с данными проектной документации.

Нахождение тестируемого объекта	Число свай	Возраст свай, лет	Состояние свай
Колорадо	13	46...59	Хорошее
Луизиана	9	0 или неизвестен	Признаны новыми
Теннеси	7	0	Новые
Миннесота	4	Неизвестен	Хорошее

Преимущества применения как резонансной частоты, так и времени отражения заключаются в большей точности измерений. Для некоторых свай использование резонансной частоты затруднено ввиду сложности расшифровки полученных данных. Для примера на рис. 2 приведена частотная характеристика, имеющая лишь один пик. По нему сложно определить резонансную частоту, так как для ее вычисления используют расстояние между пиками частот. В подобных случаях же-

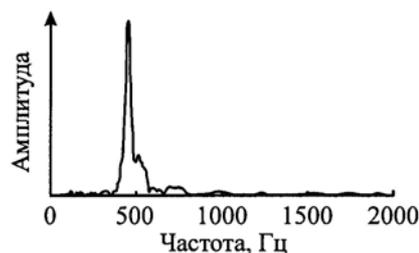


Рис. 2

лательно фиксировать время отражения, что в основном обеспечивает более точное определение длины сваи.

Для той же сваи на рис. 3 представлена зависимость колебаний от времени до (а) после (б) применения фильтра. Из рис. 3, б видно, что, замерив время между двумя маркированными точками, можно определить время отражения. По его значению получена длина сваи, равная 30 футам. Согласно проектной документации реальная длина составляет 31 фут.

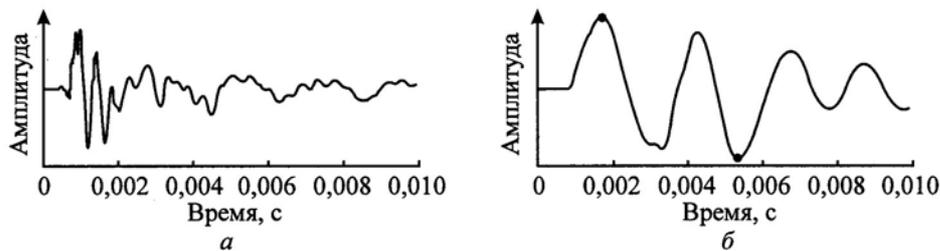
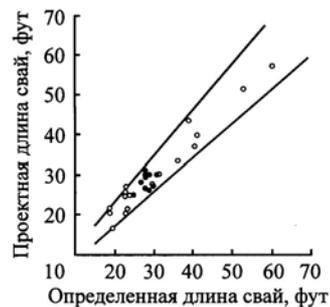


Рис. 3

Рис. 4 иллюстрирует взаимосвязь между определенной и реальной длинами свай, приведенных в таблице. Закрашенные кружки обозначают сваи из штатов Теннесси и Миннесоты. Их длину находили резонансным методом и методом времени отражения. Как видно из рисунка, точность определения находится в пределах $\pm 15\%$ и ограничена двумя асимптотами.



Как считает Н.Дж. Карино [2], данный метод наиболее удобен при обнаружении внутренних дефектов в бетоне. Ударом генерируется волна достаточной энергии для проникновения внутрь структуры. Первый удачный опыт был осуществлен при оценке отдыха свай и кессонов [5]. Позже этот способ стал известен как метод звукового эха. Достаточно большая длина свай позволяла сравнительно точно определять время между ударом и возвратом эха. Определение времени отклика системы в тонких структурах (перекрытия, плиты) намного сложнее по сравнению с протяженными структурами. Схема ударного эхо-метода конструкции с большой пустотелостью показана на рис. 5.

Рис. 4

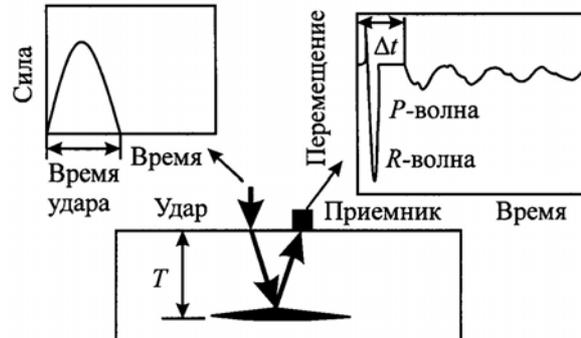


Рис. 5

Удар по поверхности генерирует S - и P - волны, распространяющиеся в глубь объекта, а также поверхностные R -волны, идущие по поверхности от точки удара. R -волна характеризует колебание поверхности тела, P -волна является следствием распространения сжатия от точки удара, S -волна – напряжений сдвига от R -волны. Когда отраженные волны или эхо возвращаются обратно к поверхности, последняя перемещается, что фиксируется приемником. Если приемник находится достаточно близко к точке удара, то доминирует эхо P -волны. На рис. 5 справа показана зависимость перемещения поверхности тела после удара. Первый минимум вызван R -волной, потом наблюдаем серию повторяющихся перемещений вследствие многократного отражения P -волны от границы дефекта и поверхности удара.

В ходе развития ударный эхо-метод обнаружения скрытых дефектов измерением времени от момента удара до возврата P -волны постепенно исчерпал себя. Появился новый способ анализа данных – частотный анализ. Его принцип показан на рис 6. P -волна, генерируемая ударом, многократно

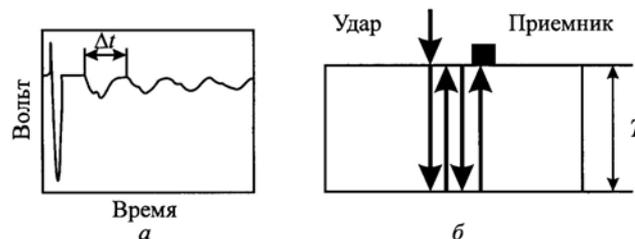


Рис. 6

отражается между проверяемой и отражающей поверхностями. Каждый раз в момент прихода P -волны контролируемая поверхность совершает некоторое перемещение. Таким образом, колебания происходят с некоторой периодичностью, зависящей от пути распространения P -волны.

Если приемник размещен около точки удара, полный путь волны равен $2T$, где T – расстояние между проверяемой и отражающей поверхностями. Как видно на рис. 6, а, временной промежуток (Δt), необходимый для возврата отраженной P -волны, – это полный путь волны, разделенный на ее

скорость (C_{pp}). Частота f прихода P -волн – величина, обратная времени прохождения волны (рис. 6, б), приблизительно ее определяют по формуле

$$f = \frac{C_{pp}}{2T}. \quad (1)$$

Выражение (1) – основное соотношение для анализа при проведении ударного эхо-теста.

Амплитудный спектр – раздел частотного анализа, задача которого заключается в определении доминантных частот в полученных кривых колебаний. Для конвертирования зависимостей амплитуды колебаний от времени в зависимости доминантных амплитуд от частоты наиболее распространено быстрое преобразование Фурье. После преобразования в амплитудный спектр можно найти частотные амплитуды, содержащиеся в графиках колебаний. Для объектов, имеющих форму пластин, частота толщины объекта обычно имеет доминантный пик. Его частоту определяют по выражению, полученному преобразованием (1):

$$T = \frac{C_{pp}}{2f}. \quad (2)$$

Применение частотного анализа в ударном эхо-тесте показано на рис. 7. Здесь *а* – амплитудный спектр сплошной железобетонной плиты толщиной 0,5 м. Можно заметить, что амплитудный пик наблюдается на частоте 3,42 кГц, что характеризуется многократным отражением P -волны от верхней и нижней поверхностей объекта. Используя выражения (1) и (2), определим величину C_{pp} , равную 3420 м/с. На рис. б показан амплитудный

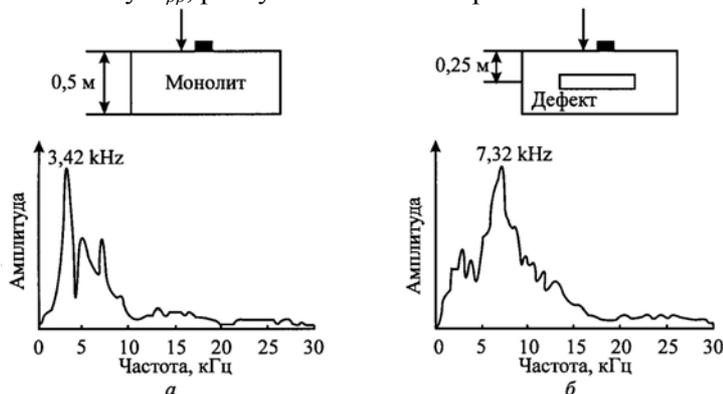


Рис. 7

спектр такой же железобетонной плиты, содержащей дефект (полость). Пик имеет место на частоте 7,32 кГц. Он определяет отражение волны от верхней поверхности и поверхности пустоты. Применяя формулу (2), вычислим глубину расположения дефекта $3420/(2 \cdot 7320) = 0,23$ м, что соответствует 0,25 м с необходимой точностью.

Ксипинг Ванг и Р.Дж. Росс [6] предложили использовать ударный волновой метод для определения качества древесины еще не срубленных деревьев. Всего замерам подвергнуто 168 деревьев. После полевых измере-

ний из стволов деревьев были вырезаны участки длиной 0,61 м и отправлены в лабораторию для дальнейших измерений. Образцы подвергли испытанию ударным волновым методом в целях определения прочностных характеристик древесины. Результаты исследования говорят о том, что применение ударного волнового метода в полевых условиях обеспечивает достаточную точность и дает возможность оценить качество древесины, не срубая деревьев. Регрессивный анализ показал хорошую корреляцию между свойствами древесины несрубленных деревьев, полученными ударным волновым методом, и свойствами древесины вырезанных образцов. Достоверность полученной модели регрессии составляет 99,9. Проведенные исследования показали возможность применения ударного волнового метода для определения свойств древесины в полевых условиях, что позволит контролировать ее качество и прогнозировать желаемые свойства биомассы, т. е. спланировать лесное хозяйство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anthony, R.W.* Determining the Length of Timber Piles in Transportation Structures [Text] / R.W. Anthony, A.K. Pandey. – Engineering Data Management, Inc, 1997.
2. *Carino, N.J.* The Impact-Echo Method: An Overview [Text] / N.J. Carino. – Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8611 USA, 2001.
3. *Davis, A.G.* Nondestructive Testing of Wood Piles [Text] / A.G. Davis // Proceeding, Second International Conference on Wood Poles and Piles; 1994, March 21-23; Fort Collins, CO.
4. *Douglas, R.A.* Determining Length of Installed Timber Pilings by Dispersive Wave Propagation Methods [Text] / R.A. Douglas, J.D. Holt // Report for the Center for Transportation Engineering Studies. – North Carolina State University, Raleigh, NC, 1993.
5. *Steinbach, J.* Caisson Evaluation by Stress Wave Propagation Method [Text] / J. Steinbach, E. Vey // J. of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. – 1975. – Vol. 101, GT4, April. – P. 361–378.
6. *Xiping, Wang.* Nondestructive Evaluation of Standing Trees with a Stress Wave Method [Text] / Xiping Wang, R.J. Ross // J. Wood and Fiber Science. – 2001. – 33(4). – P. 522–533.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 10.04.06

D.L. Neradovsky

Papers Review on Piles Length Determination

The main directions of the foreign scientific research on pile length determination and defects in building structures are provided. Other application areas for nondestructive control method are offered.
