

О ДИАГНОСТИКЕ СПЛОШНОСТИ СТВОЛА БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ МЕТОДОМ МЕЖСКВАЖИННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО МОНИТОРИНГА

Д. Ю. СНЕЖКОВ

к.т.н., доцент, доцент кафедры «Строительные материалы и
технология строительства»
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрены основы метода межскважинного ультразвукового мониторинга буронабивных свай. Представлен расчет влияния вариации модулей упругости бетона и инородных включений на скорость ультразвука и его затухание. Показана большая эффективность использования показателя затухания ультразвука в сравнении с его скоростью распространения для выявления дефектов бетона. Приведены результаты натурных испытаний буронабивных свай. Представлена расчетная методика определения показателя затухания ультразвука.

Ключевые слова: буронабивные сваи, дефектность свай, межскважинный ультразвуковой мониторинг, показатель затухания ультразвука, методика расчета, волновое сопротивление.

ABOUT THE DIAGNOSIS OF THE BORED PILES TRUNK INTEGRITY BY ULTRASONIC CROSSHOLE TESTING

D. U. SNEZHKOVA

PhD in engineering, associate professor, Department
"Building materials and construction technology"
Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article discusses the basics of bored piles ultrasonic crosshole testing. The calculation of the effect of the concrete elastic modulus variation and foreign inclusions on the ultrasound speed and ultrasound attenuation is presented. The high efficiency by the ultrasound attenuation index using in comparison with its propagation velocity for detecting concrete defects is shown. The results of field tests of bored piles are presented. A computational method for determining the ultrasound attenuation index is presented.

Keywords: bored piles, pile defectiveness, ultrasonic crosshole testing, ultrasound attenuation index, calculation method, wave resistance.

Введение.

Снижение затрат при обеспечении высокой достоверности контроля качества изготовления буронабивных свай может быть достигнуто совместным использованием метода испытаний свай нагружением и оперативных неразрушающих методов контроля [2; 3]. Поскольку геологические показатели грунтового основания фундамента остаются практически постоянными в пределах площади свайного поля, то значимое снижение несущей способности любой из свай по отношению к испытанным методом нагружения следует ожидать лишь в случае серьезных нарушений технологии ее изготовления, следствием которых могут являться следующие дефекты: фрагментация ствола сваи и инородные включения в массиве бетона, не обеспечение проектной длины, появление участков с уменьшенным эффективным сечением («шейки»), расслоение бетонной смеси, снижение прочности бетона и др. Все перечисленные дефекты могут быть обнаружены косвенными методами испытаний, в частности, – методом межскважинного ультразвукового мониторинга.

Метод ультразвукового межскважинного мониторинга (в западной классификации – CHUM – *Crosshole Ultrasonic Monitoring*) был разработан во Франции в конце 1960-х годов [8]. В соответствии с этим способом несколько расположенных на равном расстоянии стальных или пла-

стиковых труб, называемых в дальнейшем каналы доступа, обычно диаметром 50 мм, крепятся внутри арматурного каркаса и заполняются водой (см. рис. 1). После затвердевания бетона сваи, два ультразвуковых преобразователя – излучатель и приемник – погружаются в каналы и синхронно пошагово в них перемещаются.

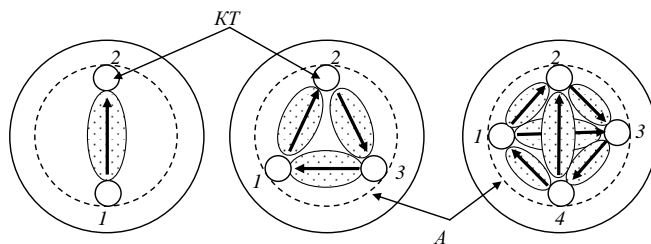


Рисунок 1 – Варианты размещения канальных труб в сечении сваи:
 КТ – канальные трубы; А – поперечная арматура, стрелками показаны возможные траектории прозвучивания бетона

Излучатель посылает ультразвуковые (УЗ) импульсы, приемный преобразователь их регистрирует. Обычно регистрируются время прихода первого вступления (FAT – *First Arrival Time*) и относительная энергия (RE – *Relative Energy*) всех импульсов. Аномальное отклонение скорости распространения УЗ импульса или его относительной энергии на участке измерения указывают на зону с некачественным бетоном. Этот метод стандартизирован [4; 7] и является ведущим методом в мире для испытания свай большого диаметра. Но, несмотря на распространенность метода СНУМ, следует констатировать отсутствие в стандартах однозначных критериев выявления дефектов сваи.

В статье производится сравнительная оценка чувствительности метода СНУМ к дефектам структуры бетона на основе измерения скорости УЗ и на основе измерения затухания УЗ импульса; предлагается алгоритм определения показателя мощности УЗ сигнала в приемном тракте прибора.

Сравнительная оценка чувствительности метода СНУМ к дефектам структуры бетона.

Скорость УЗ импульса связана с параметрами среды зависимостью

$$V_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}, \quad (1)$$

из которой следует взаимоисключающий эффект влияния на скорость УЗ модуля упругости E и плотности бетона ρ . Снижение плотности бетона сваи может иметь место при попаданиях в него грунтовых фрагментов, включений воздуха и воды. Как правило, при снижении плотности бетона происходит снижение и его модуля упругости, поэтому скорость УЗ изменяется в значительно меньшей степени, чем каждый из указанных параметров. Данное обстоятельство может затруднить выявление дефектов сплошности бетонного ствола сваи методом СНУМ в случаях, когда дефект имеет диффузный характер, с невыраженным снижением плотности в зоне дефектности, а диагностическим параметром является скорость (время) распространения УЗ импульса в зоне контроля.

Кроме скорости УЗ импульса метод СНУМ предполагает использование в качестве диагностического параметра качества бетона показателя затухания УЗ импульса [6]. Использование этого параметра обычно вызывает у исследователей некоторые затруднения, поскольку при обычных ультразвуковых испытаниях бетона, например, при оценке его прочности показатель затухания УЗ не используется. Причина, в первую очередь, кроется в нестабильности акустического контакта преобразователей с бетоном, вследствие чего возникающая значительная вариация амплитуд зондирующего импульса и импульса на приеме может полностью замаскировать проявление эффекта затухания УЗ в контролируемом бетоне. Типовая методика СНУМ свободна от этого недостатка, поскольку передача УЗ импульса и его прием происходит через иммерсионную среду – воду, что практически устраняет нестабильность акустического контакта. Но производители УЗ приборов, в частности, прибора «Пульсар-2.2 ДБС», не предоставляют никакой информации об алгоритме оценки мощности УЗ сигнала на приеме, что превращает ука-

занный прибор в некую «вещь в себе», что и исключает возможность сопоставления показателя мощности с данными других приборов.

Как указывалось выше, вариация модуля упругости бетона и его плотности могут взаимно компенсировать свое влияние на скорость УЗ импульса. Поэтому рассмотрим предельный случай, когда указанные два параметра не коррелированы. Продифференцируем выражение (1) по модулю упругости E , рассматривая плотность ρ и коэффициент Пуассона как константы

$$\frac{dV}{dE} = 0,5 \cdot \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \cdot \frac{1}{\sqrt{E \cdot \rho}}. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) следует выражение для относительного показателя чувствительности скорости УЗ при вариации модуля упругости

$$\frac{dV}{V} = 0,5 \cdot \frac{dE}{E}. \quad (3)$$

Такое же выражение, но со знаком минус в правой части будет для чувствительности скорости УЗ от вариации плотности бетона ρ .

При распространении УЗ импульса имеет значение не только наличие прямой трассы, соединяющей излучатель и приемник, но и состояние соседних областей смежных с прямой трассой. На рис. 1 показана схема распространения УЗ импульса в сечении ствола сваи между преобразователями в канальных трубах.

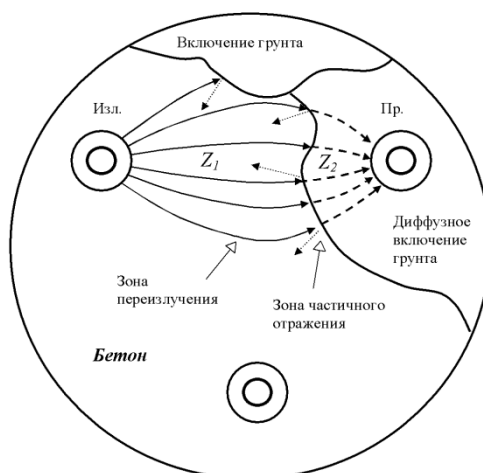


Рисунок 2 – Схема влияния дефектов сплошности бетона на процесс распространения ультразвукового импульса

В соответствии принципом Гюйгенса, каждая точка среды, через которую проходит волновой фронт, может рассматриваться как переизлучатель – виртуальный источник волн, множество которых и формирует волновой фронт в точке приема. Если дефекта вблизи прямой трассы нет, то время распространения ультразвукового импульса будет минимальным, а энергия максимальная (с учетом суммирования всех волн от виртуальных излучателей). При наличии выраженного дефекта, например, крупных включений грунта, часть таких виртуальных излучателей исчезает и, соответственно, в точку приема поступит меньше энергии, хотя время регистрации волны в точке приема изменится незначительно. Затухание УЗ импульса на трассе контроля зависит от множества факторов, в частности: геометрического рассеивания, потерь энергии связанных с эффектами динамической вязкости бетона, рассеивания УЗ волны на структурных неоднородностях бетона, эффектами отражения волны от макродефектов структуры бетона. Из указанного перечня рассмотрим только последний фактор.

Описание процесса прохождения акустической волны через границу, разделяющую среды с разными физико-механическими свойствами, формализуют использованием параметра волнового сопротивления среды Z , которое может быть выражено через плотность среды ρ и скорость акустической волны V следующей зависимостью

$$Z = \rho \cdot V = \sqrt{\rho \cdot E} . \quad (4)$$

Если акустическая волна проходит границу раздела двух сред с акустическими сопротивлениями Z_1 и Z_2 (см. рис. 2), то на границе произойдет формирование отраженной волны с амплитудой P_1 и поглощенной с амплитудой P_2 . Зависимость коэффициента поглощения β , который определяет мощность волны регистрируемой приемником, выражается следующей формулой

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} . \quad (5)$$

Из выражения (5) определим производную β по Z_2

$$\frac{d\beta}{dZ_2} = \frac{4Z_2 + 2Z_1}{(Z_1 + Z_2)^2} . \quad (6)$$

Найдем параметр чувствительности коэффициента поглощения к вариации волнового сопротивления Z_2

$$\frac{d\beta}{\beta} = \frac{2Z_2 + Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{dZ_2}{Z_2} . \quad (7)$$

Заменим абсолютные значения волновых сопротивлений относительным показателем $z = Z_2/Z_1$, формула (7) приобретет вид

$$\frac{d\beta}{\beta} = \frac{2z + 1}{z + 1} \cdot \frac{dZ_2}{Z_2} . \quad (8)$$

Для сопоставимости полученного результата с данными по формуле (3) рассмотрим обе оценки для случая равенства плотности бездефектного бетона и бетона с диффузным включением грунта. В этом случае формула (8) примет вид

$$\frac{d\beta}{\beta} = K \cdot \frac{dE_2}{E_2} , \quad (9)$$

где

$$K = 0,5 \cdot \frac{2\sqrt{\zeta} + 1}{\sqrt{\zeta} + 1} , \quad \zeta = E_2/E_1 .$$

На рис. 3 показана зависимость показателя чувствительности K от соотношения модулей упругости E_1 и E_2 .

Видно, что показатель чувствительности мощности УЗ импульса к вариации модулей упругости K превосходит показатель чувствительности скорости УЗ импульса к вариации модуля упругости для типовых значений модуля упругости в среднем в полтора раза. При этом не учитывалось положительное влияние на величину K вариации плотности бетона, которая, как следует из формулы (1), должна дополнительно увеличивать показатель чувствительности.

Полученный результат указывает на то, что показатель затухания волны (относительная энергия) β является более чувствительным параметром к наличию дефектов бетона, в сравнении с таким традиционным показателем, как скорость распространения волнового фронта.

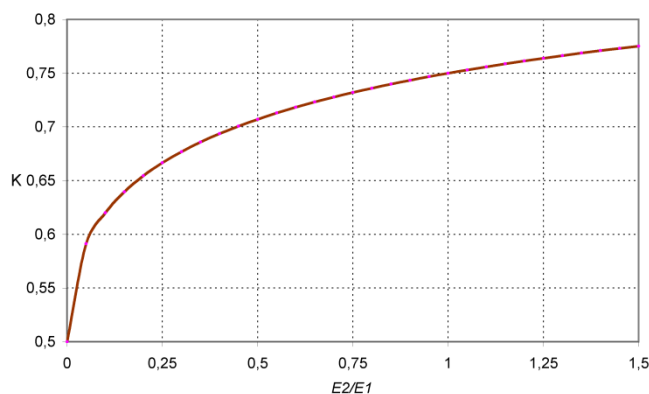


Рисунок 3 – Зависимость показателя чувствительности коэффициента затухания УЗ от соотношения модулей упругости бетона

Определение показателя затухания ультразвукового импульса.

Оценка относительной энергии ультразвукового импульса обычно производится по амплитуде сигнала [6]. Но, как показала практика проведения ультразвукового мониторинга, у такой методики есть серьезный изъян, обусловленный большим диапазоном вариации мощности сигнала на приеме. С одной стороны, – возможно достижение УЗ импульсом уровня ограничения, с другой стороны – присутствие сигнала помехи, который по амплитуде может стать соизмеримым с информационным УЗ импульсом, не позволяет иметь уровень сигнала ниже уровня помехи. Наличие двух границ – нижней и верхней, в пределах которых можно зарегистрировать амплитуду УЗ сигнала, создает определенную техническую проблему – необходимость оператору непрерывно отслеживать размах УЗ сигнала, не позволяя ему регулировкой чувствительности прибора достигать порога ограничения. Такая процедура измерений значительно замедляет контроль и увеличивает нагрузку на оператора. Выставить же изначально низкую чувствительность приемного тракта прибора нельзя, так как резко снизится точность регистрации времени (скорости) распространения УЗ импульса [5]. На рис. 4 показана временная диаграмма сигнала акустического импульса, не достигающего порога ограничения.

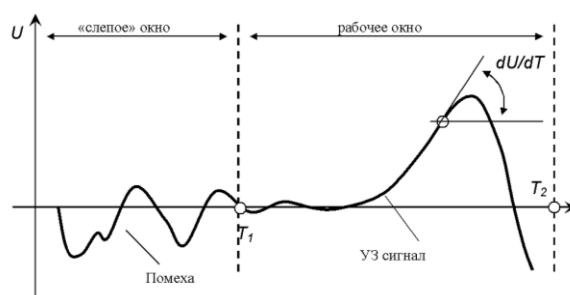


Рисунок 4 – Ультразвуковой сигнал ниже порога ограничения

На рис. 5 показан акустический импульс достигающий порога ограничения.

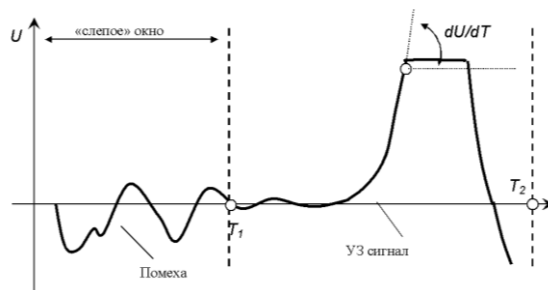


Рисунок 5 – Ультразвуковой сигнал достигший порога ограничения

По стандартной методике энергию такого импульса оценить невозможно, так как его амплитуда неизменна и равна уровню ограничения независимо от фактического размаха сигнала на входе приемного тракта прибора.

Упростить процедуру обработки данных УЗ мониторинга и автоматически получать показатель затухания энергии УЗ импульса β на трассах прозвучивания ствола сваи можно используя в качестве показателя затухания не амплитуду первого вступления УЗ импульса, а максимальное значение производной сигнала по времени – dU/dT (см. рис. 4 и рис. 5) для первого вступления УЗ сигнала, то есть

$$\beta^* = \frac{dU}{dT} . \quad (10)$$

Главным достоинством предлагаемой методики является слабая зависимость результата оценки β^* от начальных настроек измерительного тракта УЗ прибора, и простое решение задачи автоматизации обработки массива данных УЗ сигнала, например, в среде MS Excel.

На рис. 6 показаны ультразвуковые профили буронабивной сваи, изготовленной по технологии полого шнека на объекте «Минск-Мир» (г. Минск). Темными точками на диаграмме рис. 6, *а* показан профиль сваи по данным измерения скорости УЗ. Время распространения УЗ определялось по типовой процедуре FAT, с ручной коррекцией позиции первого вступления. На этой же диаграмме приведены данные полученные обработкой сигналов программой «Пульсар-ДБС-2.2», которая оказалась не в состоянии отслеживать «истинный» момент времени регистрации УЗ сигнала, в результате чего получались сильно заниженные оценки скорости УЗ. На диаграмме рис. 6, *б* показан ультразвуковой профиль этой же сваи по данным автоматического расчета показателя затухания УЗ – dU/dU_{max} . Отчетливо наблюдается дефектная область сваи в интервале отметок 0 м...–10 м, где уровень УЗ сигнала составляет 0 %...50 % от среднего уровня для бездефектной зоны ниже –10 м. Данные измерения скорости УЗ также указывают на некоторое ухудшение качества бетона на отметках 0 м...–10 м. Но наблюдаемое снижение скорости с 4000 м/с до 3750 м/с можно трактовать лишь как снижение прочности бетона на 15 %...25 % ориентируясь на методику ГОСТ [1]. В то же время, данные оценки затухания УЗ указывают на значительные нарушения сплошности ствола сваи.

Следует отметить следующие два момента. Значения скорости УЗ на отметках –1,5 м и –27,5 м совпадают (см. рис. 6, *а*). В то же время по данным оценки показателя затухания УЗ отметка –1,5 м является зоной дефектности, а отметка –27,5 м не является. Это указывает на лучшую селективность контроля дефектов бетона по затуханию УЗ сигнала.

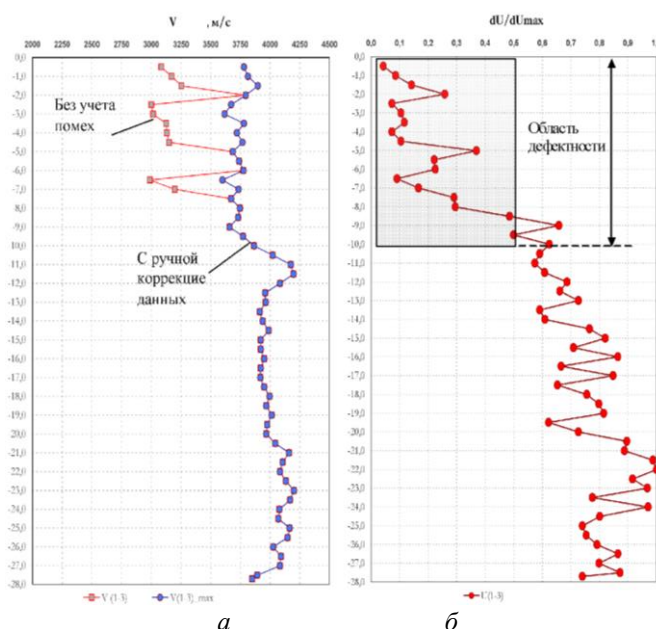


Рисунок 6 – Ультразвуковые профили буронабивной сваи (объект Минск-Мир):
а – параметр – скорость распространения УЗ импульса;
б – параметр – относительная энергия ультразвукового импульса

Второй момент парадоксальный: высокая точность определения скорости УЗ приводит к потере чувствительности метода к дефектности бетона. Грубые (без учета помех) оценки скоро-

сти УЗ (см. рис. 6, а) явно указывают на дефектность бетона значительным понижением скорости, а точные оценки (с ручной коррекцией данных), как указывалось выше, – дефект «чувствуют» слабо.

Выводы.

1. Для метода межскважинного ультразвукового мониторинга буронабивных свай предложена расчетная методика определения энергии принятого ультразвукового импульса, отличающаяся от стандартизированных использованием параметров переднего фронта импульса. Методика позволяет снизить вероятность ошибочных результатов при оценке дефектности бетонного ствола свай.

2. Представлены данные испытаний буронабивных свай акустическими методами; показана одна из причин возможных измерительных ошибок метода межскважинного ультразвукового мониторинга, и рассмотрены методические приемы их устранения.

Литература:

1. ГОСТ 17624-2012. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. – М.: НИИЖБ им. А. А. Гвоздева, 2014. – 16 с.
2. Капустин, В. В. Возможности сейсмоакустических и ультразвуковых методов при контроле качества свайных фундаментов / А. А. Чуркин, И. Н. Лозовский, А. В. Кувалдин // Геотехника. – 2018. – Т. 10. № 5–6. – С. 62–71.
3. Леонович, С. Н. Исследование эхо-импульсного метода контроля буронабивных свай / Д. Ю. Снежков, Н. А. Будревич // Вестник инженерной школы ДВФУ, 2021. – № 3 (48) – С. 74–82.
4. ASTM D6760-16: Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing, Vol. 04–09. – Pp. 943–949, West Conshohocken PA.
5. Amir J. M. Determining First Arrival Time and Wave Speed in Cross-Hole Ultrasonic (CSL) Erez I Amir. Piletest Piletest Technical Notes Apr-2016, pp. 122–138.
6. Amir J. M. Relative Energy in Cross-Hole Ultrasonic (CSL) Piletest Piletest Technical Notes Nov-2016. – Pp. 139–144.
7. JGJ-106-2014 Технический стандарт для обследования свай фундамента здания (Промышленный стандарт Китайской Народной Республики), 2014-10-01. – P. 80.
8. Levy, J.F Sonic pulse method of testing cast-in-site concrete piles. Ground Engineering Proc 5th Intl. Conf on Application of Stress Wave Theory to Piling, Orlando, pp. 859-869., 1970., London, 3 (3). – Pp. 17–19.

References:

1. GOST 17624-2012. Betony. Ul'trazvukovoj metod opredeleniya prochnosti. – M.: NIIZHB im. A. A. Gvozdeva, 2014. – 16 s. (rus).
2. Kapustin, V. V. Vozmozhnosti sejsmoakusticheskikh i ul'trazvukovykh metodov pri kontrole kachestva svajnyh fundamentov / A. A. Churkin, I. N. Lozovskij, A. V. Kuvaldin // Geotekhnika. – 2018. – T. 10. № 5–6. – S. 62–71. (rus).
3. Leonovich, S. N. Issledovanie ekhoimpul'snogo metoda kontrolya buronabivnyh svaj / D.Yu. Snezhkov, N. A. Budrevich // Vestnik inzhenernoj shkoly DVFU, 2021. – № 3 (48). – S. 74–82. (rus).
4. ASTM D6760-16: Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing, Vol. 04–09 pp. 943–949, West Conshohocken PA.
5. Amir J. M. Determining First Arrival Time and Wave Speed in Cross-Hole Ultrasonic (CSL) Erez I Amir. Piletest Piletest Technical Notes Apr-2016, pp. 122–138.
6. Amir J. M. Relative Energy in Cross-Hole Ultrasonic (CSL) Piletest Piletest Technical Notes Nov-2016, pp. 139–144.
7. JGJ-106-2014 Tekhnicheskij standart dlya obsledovaniya svaj fundamenta zdaniya (Promyshlennyj standart Kitajskoj Narodnoj Respubliki), 2014-10-01. – P. 80. (rus).
8. Levy, J. F Sonic pulse method of testing cast-in-site concrete piles. Ground Engineering Proc 5th Intl. Conf on Application of Stress Wave Theory to Piling, Orlando, pp. 859–869., 1970., London, 3 (3), pp. 17–19.