

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-180-191

*Д.Г. САМАРИН, В.Л. УСТЮЖАНИН, А.А. ЛОБАНОВ,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДЛИНЫ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ, ОСНОВАННЫМИ НА СХЕМЕ ДВУХ КАНАЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Неразрушающий контроль строительных конструкций является эффективным способом проверки требуемых параметров. Одно из перспективных направлений – определение длины свай акустическими методами. Эти методы основаны на возбуждении и регистрации упругих волн на поверхности свай. Ограничением акустических методов является то, что скорость возбуждаемых упругих волн в теле свай предполагается заранее известной. Опыт исследований показывает, что на практике применение этого условия может приводить к значительной погрешности. Особенно это актуально для буронабивных свай, где скорость распространения упругих волн определяется множеством различных факторов. В рамках конкретного примера показана возможность повышения точности измерения скорости акустических волн в буронабивных сваях. Использование схемы двух каналов измерения, построенной на вводе установленного расстояния между приемными устройствами, позволило повысить точность измерения до 5 %.

Ключевые слова: акустические методы определения длины свай; буронабивные сваи; скорость распространения акустических волн в свае; поверхностный метод определения длины свай.

Для цитирования: Самарин Д.Г., Устюжанин В.Л., Лобанов А.А. Исследования по определению длины буронабивных свай акустическими методами, основанными на схеме двух каналов измерения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 4. С. 180–191.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-180-191

*D.G. SAMARIN, V.L. USTYUZHANIN, A.A. LOBANOV,**Tomsk State University of Architecture and Building*

ACOUSTIC MEASUREMENTS OF BORED PILE LENGTH USING TWO CHANNELS

Non-destructive testing of structures is an effective way to determine their required parameters. One of the promising directions is the acoustic measurement of the pile length using two channels. This method is based on the excitation and registration of elastic waves on the pile surface. A limitation of acoustic methods is that the speed of the elastic waves in the pile is assumed to be known in advance. Research results show that the practical application of this condition can lead to a significant error. This is especially true for bored piles, where the speed of the elastic wave propagation is determined by many different factors. This paper proposes to increase the measurement accuracy of the acoustic wave speed in the bored pile. The use of two measurement channels, which implies the introduction of the specified distance between the receiving devices, made it possible to increase the measurement accuracy up to 5 %.

Keywords: acoustic method; bored pile; acoustic wave speed; surface method; pile length.

For citation: Samarina D.G., Ustyuzhanin V.L., Lobanov A.A. Issledovaniya po opredeleniyu dliny buronabivnykh svai akusticheskimi metodami, osnovannymi na

skheme dvukh kanalov izmereniya [Acoustic measurements of bored pile length using two channels]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 4. Pp. 180–191. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-180-191

В практике строительства для решения задач по определению длины свай находят применение различные акустические методы (поверхностный метод, параллельный метод, метод, основанный на наблюдении в скважине «направляемых» волн) [1–14], которые основаны на анализе движения акустической волны и ее отражений в исследуемой свае. Данные методы соответствуют стандарту ASTM-D5882 [8].

Поверхностный метод является наиболее экономичным и обеспечивающим возможность проведения в короткие сроки значительного количества испытаний.

Принцип, на котором основан поверхностный метод, заключается в возбуждении и регистрации акустических волн на поверхности сваи (рис. 1, а). Возникающий вследствие механического воздействия на оголовок сваи ударный импульс приводит к созданию в свайном теле акустической волны. Волна распространяется вдоль ствола сваи и отражается от ее пяты (рис. 1, б). Отраженные волны возвращаются к верху сваи и регистрируются датчиком ускорения (акселерометром), установленным на оголовке сваи. Полученный сигнал интегрируется и представляется в виде сигнала скорости.

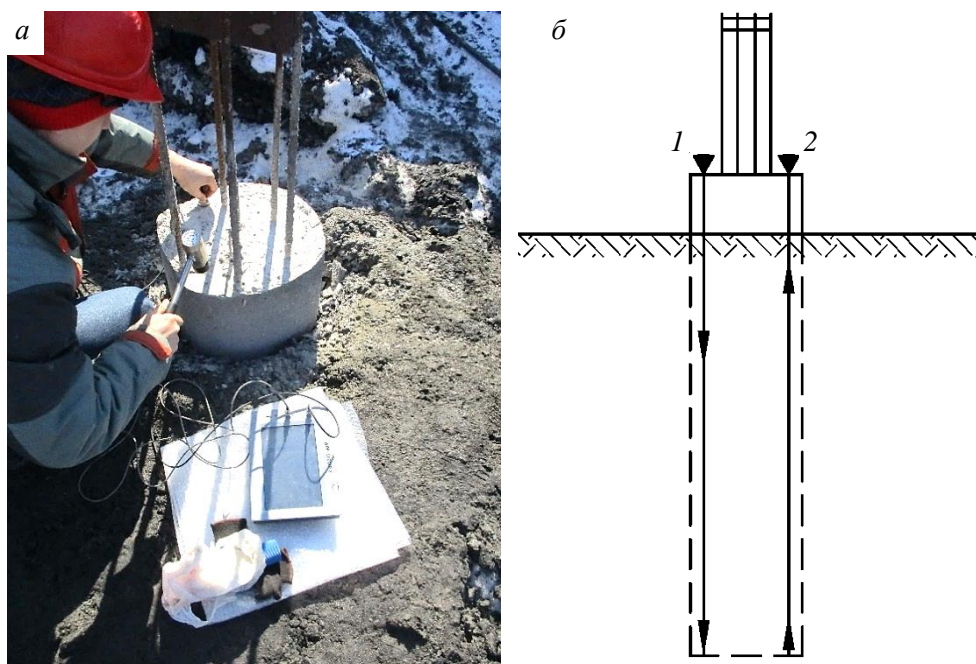


Рис. 1. Пример проведения исследований сваи поверхностным методом:

а – общий вид фрагмента исследований сваи; б – схема проведения исследований сваи: 1 – источник (место ударного воздействия на сваю); 2 – приемник (акселерометр)

Одним из основных ограничений поверхностного метода определения длины свай является то, что скорость в свае предполагается заранее известной. При соблюдении этого требования длина свай определяется по зависимости

$$L_{\text{св}} = \frac{V \cdot \Delta t}{2}, \quad (1)$$

где Δt – интервал времени между моментами механического воздействия на сваю и получением акселерометром сигнала от акустической волны, отраженной от пяты сваи, равен времени, необходимому для распространения волны по стволу сваи длиной, равной $2L_{\text{св}}$; V – заданная скорость продольной волны в свае данного типа.

Скорость V определяется по следующей зависимости:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2)$$

где E – модуль Юнга; ρ – плотность материала свай.

Из приведенной зависимости (1) видно, что погрешность определения длины свай напрямую зависит от того, насколько точно задана скорость распространения волны в свае.

Опыт имеющихся исследований показывает, что для буронабивных свай непосредственное применение условия (2) может привести к значительной погрешности определения их длины. На скорость распространения акустических волн в буронабивных сваях влияет множество факторов (однородность строения материала тела свай, возраст бетона, вид и количество крупного заполнителя в бетоне и т. д.).

Целью настоящей работы является оценка возможности повышения точности измерения скорости акустических волн в буронабивных сваях при использовании поверхностного метода определения длины свай.

Исследования свай проводились на площадке строительства комплекса сооружений обогатительной фабрики угля, расположенной в г. Киселевске Кемеровской области.

Инженерно-геологические условия строительной площадки

По материалам проектных решений в геолого-литологическом строении площадка строительства представлена следующими инженерно-геологическими элементами (ИГЭ) (рис. 2):

ИГЭ 1а. Техногенный (насыпной) щебенисто-дресвяный грунт с суглинистым заполнителем до 30 %.

ИГЭ 1б. Техногенный (насыпной) суглинистый грунт, от полутвердой до мягкопластичной консистенции, с включением щебня, дресвы, строительного мусора до 15 %.

ИГЭ 3б. Суглинки озерно-болотные, голубовато-серого цвета, слабозаторфованные.

ИГЭ 4а. Суглинки аллювиальные, серо-коричневые, пылеватые мягкопластичной консистенции с примесью органического вещества.

ИГЭ 4б. Суглинки аллювиальные, серо-коричневые, пылеватые, мягкопластичной консистенции с примесью органического вещества.

ИГЭ 4г. Песок гравелистый (отложения р. Абы), серый, водонасыщенный.

ИГЭ 5. Коренные породы, представленные элювием аргиллита, алевролита, выветренного до состояния суглинка и глины с включением дресвы и щебня до 30 %.

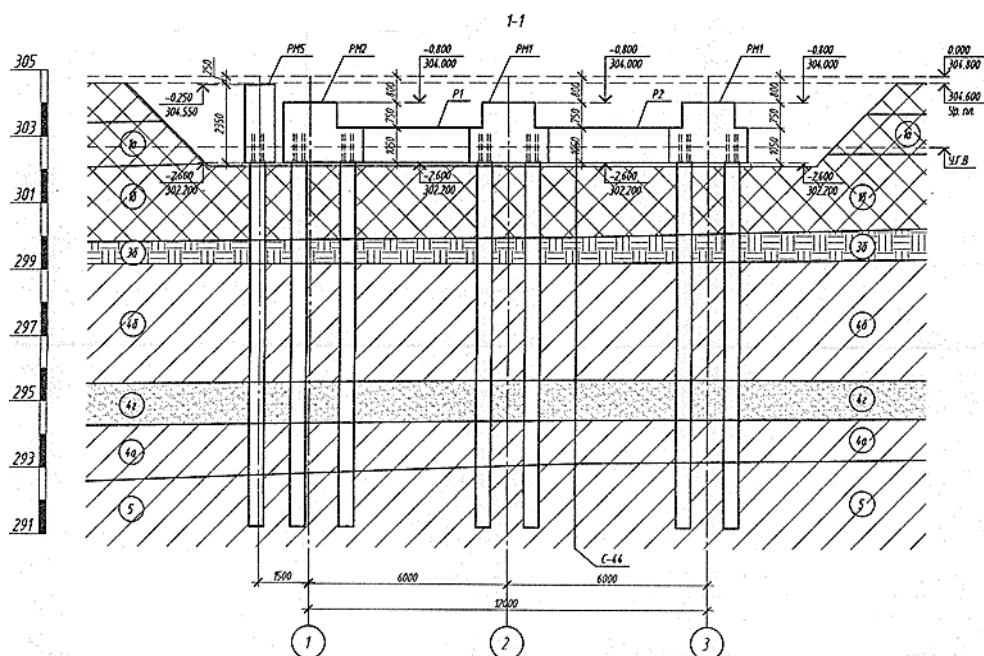


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез площадки строительства объекта с посадкой свайного основания

По гидрогеологическим условиям площадка относится к подтопляемой. При бурении скважин уровень грунтовых вод обнаружен на отметке 302.6.

В соответствии с проектом под комплекс сооружений предполагается устройство свайного основания (рис. 2).

Сваи запроектированы бурунабивные железобетонные диаметром 450 мм. Для свай принят бетон прочности В25, морозостойкости F150, водонепроницаемости W8. Бетонирование железобетонных свай производится с применением добавки «Пенетрон-Адмикс» из расчета 4 кг добавки на 1 м³. Арматура класса АIII, марки 25Г2С.

Сваи по условиям взаимодействия с грунтом являются сваями-стойками. Основанием для свай является скальный грунт – алевролит средней прочности. Длина свай 11 м и выбрана из условия заглубления в грунт на 0,5–2,0 м.

Методика проведения исследований свай

Для проведения исследований были изготовлены три опытные сваи с контролируемой длиной ($L = 11$ м) (рис. 3). Буронабивные сваи устраивались по технологии непрерывного полуголового шнека (CFA), $\varnothing 450$ мм.



Рис. 3. Подготовленные опытные сваи

Оценка возможности повышения точности измерения скорости акустических волн в свае, при использовании поверхностного метода определения длины свай, заключалась в применении способа, основанного на схеме двух каналов измерения (рис. 4).

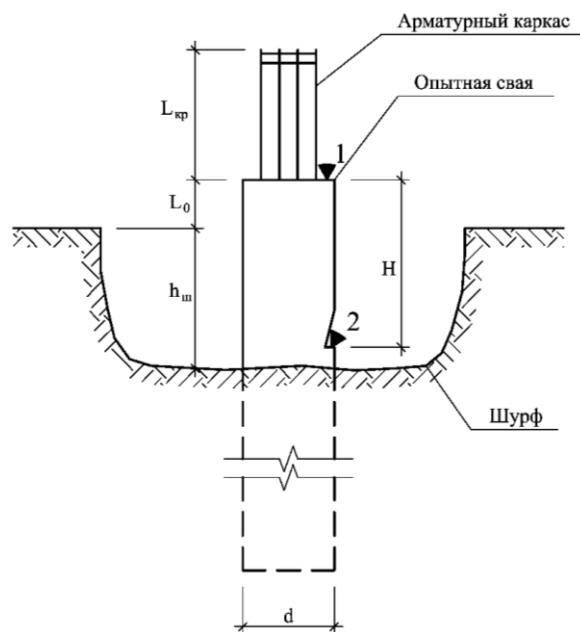


Рис. 4. Схема подготовки сваи к исследованиям по схеме двух каналов измерения:
1, 2 – места расположения вибродатчиков; H – заданное расстояние между датчиками

В ходе испытаний свай были использованы: ударный инструмент, два вибродатчика и устройство для считывания сигналов. Первый вибродатчик, который может быть также совмещен с ударным инструментом (первый канал измерения), располагался на оголовке сваи, второй датчик устанавливался на заданном расстоянии по длине сваи (второй канал измерения) (рис. 4).

Для расположения датчиков на свае были подготовлены горизонтальные контактные площадки. Оси вибродатчиков и вектор распространения ударного импульса должны лежать максимально близко к одной прямой.

Схема двух каналов измерения работает следующим образом. Ударным инструментом осуществляется механическое воздействие на оголовки свай. Зафиксированные сигналы с вибродатчиков показывают время прохождения акустической волной заданного расстояния (H). Тогда значение скорости можно рассчитать по следующей формуле:

$$V_{\text{уст}} = \frac{L_{\text{изв}}}{\Delta t}, \quad (3)$$

где $L_{\text{изв}}$ – база измерений (заданное расстояние H между датчиками), м; Δt – разности по времени между двумя сигналами, с.

При использовании прибора «Спектр-3» скорость распространения акустической волны $V_{\text{уст}}$ можно определить по формуле

$$V_{\text{уст}} = \frac{L_{\text{изв}}}{2L_{\text{уст}}} V_{\text{прин}}, \quad (4)$$

где $V_{\text{прин}}$ – типовое значение скорости волны в свае данного типа, определяемое по формуле (2), м/с; $L_{\text{изв}}$ – база измерений (заданное расстояние (H) между датчиками), м; $L_{\text{уст}}$ – расстояние между пиками сигналов датчиков, м.

Тогда длина сваи рассчитывается по формуле

$$L_{\text{св}} = V_{\text{уст}} \cdot \Delta t, \quad (5)$$

где $V_{\text{уст}}$ – скорость распространения волны в свае, м/с; Δt – время прохождения волной заданного расстояния ($L_{\text{изв}}$), с.

Результаты измерений скорости акустических волн и длины буронабивных свай приведены на рис. 5 и в табл. 1–7.

Таблица 1

Скорость распространения сигнала в свае № 1

№ удара	Типовая скорость волны в свае $V_{\text{прин}}$, м/с	База измерений, м	Расстояние между пиками сигналов по прибору, м	Значение скорости волны в свае $V_{\text{опр}}$, м/с
1	3535	0,95	0,57	2945,8
2	3535	0,95	0,6	2798,54
3	3535	0,95	0,59	2845,97
4	3535	0,95	0,55	3052,95
5	3535	0,95	0,62	2708,26
6	3535	0,95	0,64	2968,75
Значение скорости в свае № 1				2889,77

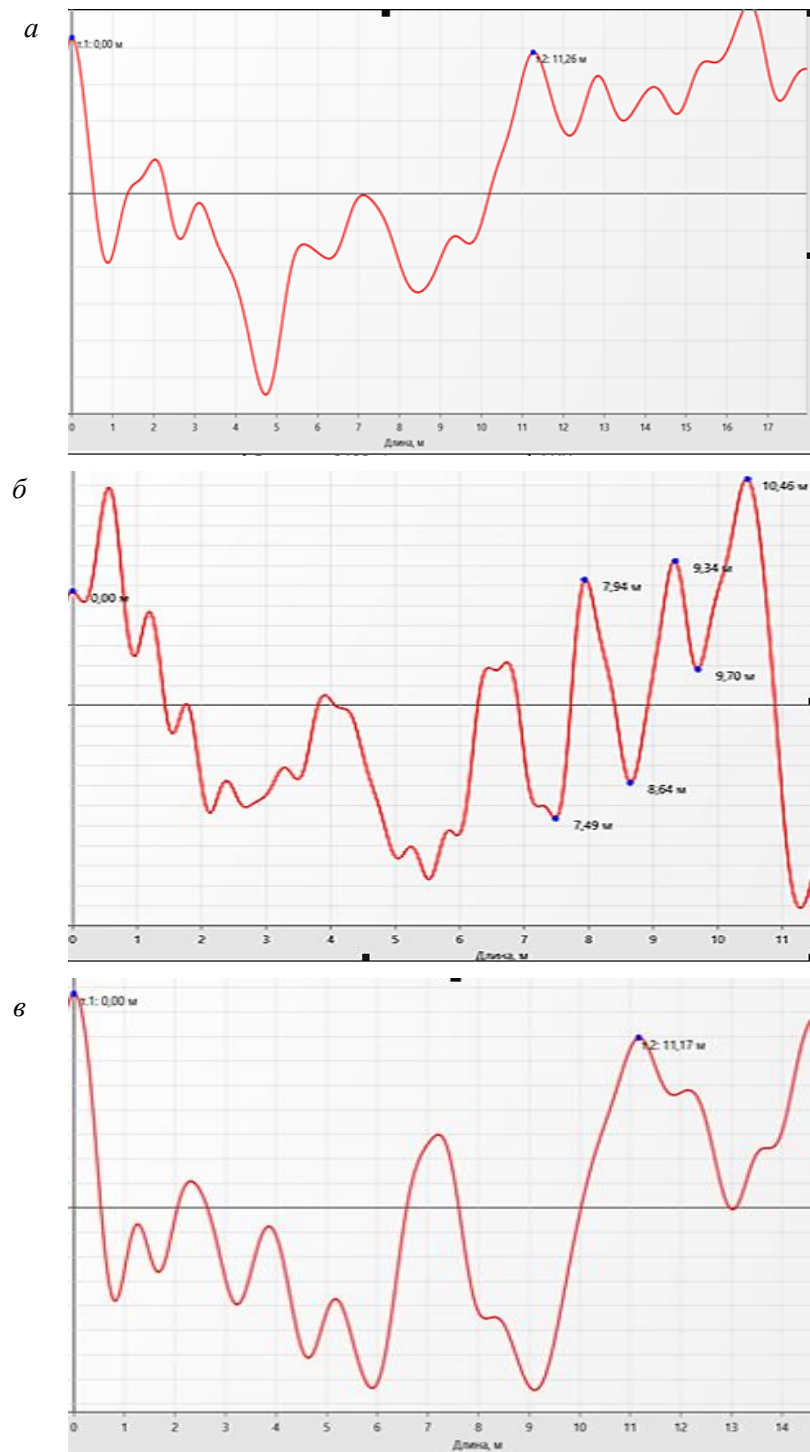


Рис. 5. Характерные графики отображения акустических волн с установленными частными значениями длины сваи:
a – $L = 11,26$ м; *б* – $L = 10,46$ м; *в* – $L = 11,17$ м

Таблица 2

Скорость распространения сигнала в свае № 2

№ удара	Типовая скорость волны в свае $V_{\text{прин}}, \text{м/с}$	База измерений, м	Расстояние между пиками сигналов по прибору, м	Значение скорости волны в свае $V_{\text{опр}}, \text{м/с}$
1	3535	0,91	0,5	3216,85
2	3535	0,91	0,52	3093,12
3	3535	0,91	0,56	2872,18
4	3535	0,91	0,54	2978,56
5	3535	0,91	0,51	3153,77
6	3535	0,91	0,53	3034,76
Значение скорости в свае № 2				3065,05

Таблица 3

Скорость распространения сигнала в свае № 3

№ удара	Типовая скорость волны в свае $V_{\text{прин}}, \text{м/с}$	База измерений, м	Расстояние между пиками сигналов по прибору, м	Значение скорости волны в свае $V_{\text{опр}}, \text{м/с}$
1	3535	0,99	0,66	2651,25
2	3535	0,99	0,63	2777,5
3	3535	0,99	0,58	3016,9
4	3535	0,99	0,61	2868,56
5	3535	0,99	0,56	3124,68
6	3535	0,99	0,58	3016,93
Значение скорости в свае № 3				2919,97

Таблица 4

Скорость распространения акустической волны в свае

№ сваи	Скорость волны в свае, м/с	Установленное значение скорости акустической волны в свае $V_{\text{уст}}, \text{м/с}$
1	2889,77	2958,26
2	3065,05	
3	2919,97	

Таблица 5

Результаты определения длины сваи № 1

№	$\Delta t, \text{с}$	$V_{\text{прин}}, \text{м/с}$	$L_{\text{св}}, \text{м}$	$V_{\text{опр}}, \text{м/с}$	$L_{\text{св}}, \text{м}$
1	0,0039	3535	13,78	2945,8	11,7
2	0,0042	3535	14,8	2798,54	11,9
3	0,0039	3535	13,8	2845,97	11,6

Окончание табл. 5

№	Δt , с	$V_{\text{прин}}$, м/с	$L_{\text{св}}$, м	$V_{\text{опр}}$, м/с	$L_{\text{св}}$, м
4	0,0038	3535	13,4	3052,95	11,9
5	0,0037	3535	13,07	2708,26	10,1
6	0,0035	3535	12,37	2968,75	10,3
Длина свай $L_{\text{св}}$			13,4 м	Длина свай $L_{\text{св}}$	11,38 м

Таблица 6

Результаты определения длины свай № 3

№	Δt , с	$V_{\text{прин}}$, м/с	$L_{\text{св}}$, м	$V_{\text{опр}}$, м/с	$L_{\text{св}}$, м
1	0,0038	3535	13,4	2651,25	10,2
2	0,0037	3535	13,07	2777,5	10,5
3	0,0039	3535	13,8	3016,9	11,9
4	0,0041	3535	14,5	2868,56	11,8
5	0,0038	3535	13,43	3124,68	12,1
6	0,004	3535	14,1	3016,93	12,0
Длина свай $L_{\text{св}}$			13,7 м	Длина свай $L_{\text{св}}$	11,57 м

Таблица 7

Результаты определения длины свай № 2

№	Δt , с	$V_{\text{прин}}$, м/с	$L_{\text{св}}$, м	$V_{\text{опр}}$, м/с	$L_{\text{св}}$, м
1	0,0037	3535	13,08	3216,85	12,1
2	0,0037	3535	13,08	3093,12	11,6
3	0,0036	3535	12,7	2872,18	10,46
4	0,0038	3535	13,4	2978,56	11,26
5	0,0038	3535	13,4	3153,77	12,2
6	0,0036	3535	12,7	3034,76	11,17
Длина свай $L_{\text{св}}$			13,2 м	Длина свай $L_{\text{св}}$	11,53 м

Сопоставление значений скоростей акустических волн, полученных по формуле (2) и схеме двух каналов измерения, показывает, что в рассматриваемом случае их разница может достигать 20 %. Так скорость акустических волн по формуле (2) составила 3535 м/с, по схеме двух каналов измерения – 2958,6 м/с.

Установлено, что погрешность измерения длины свай, определяемая по формулам (1) и (2), может достигать 23 %. Так расчетная длина свай составляет $L = 13,5$ м при фактической ее длине $L = 11$ м.

Сопоставление фактической длины свай с результатами ее определения способом двухканального измерения показывает погрешность расхождения значений не более 5 %. При фактической длине свай $L = 11$ м установленная длина свай составила $L = 11,5$ м.

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующее заключение:

– на конкретном примере показано, что применение способа определения скорости акустических волн, основанного на схеме двух каналов измерения, может значительно повысить точность определения длины буронабивных свай;

– поверхностный метод определения длины свай является наиболее экономичным и позволяет за короткие сроки провести большой объем испытаний свай. Однако данный метод предполагает, что скорость акустических волн в свае заранее известна. Для буронабивных свай, где скорость акустических волн зависит от многих факторов, это может привести к значительной погрешности. Например, в ходе исследований свай была установлена расчетная скорость акустической волны (формула (2)) $V = 3535$ м/с, а значение измеренной скорости составило $V = 2958,26$ м/с;

– из зависимости (1) видно, что погрешность определения длины свай напрямую зависит от того, насколько точно задана скорость распространения акустической волны в теле сваи. Так результаты проведенных исследований показывают, что погрешность определения длины буронабивных свай по формулам (1) и (2) достигает 23 %. При расчетной скорости $V = 3535$ м/с длина свай составила $L = 13,5$ м при фактической ее длине $L = 11,0$ м;

– установлено, что использование схемы двухканального измерения скорости акустических волн позволяет значительно повысить точность измерения длины буронабивных свай поверхностным методом. Сопоставление результатов исследований свай показало, что погрешность не превышает 5 %. Так при измерении длины свай рассматриваемый метод дает значение $L = 11,5$ м при фактической длине свай $L = 11$ м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Капустин В.В. Применение волновых методов для определения длины свай // Технологии сейсморазведки. 2009. № 2. С. 113–117.
2. Капустин В.В. Методика изучения особенностей распространения акустических волн в бетонных сваях с использованием методов численного моделирования // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2008. № 3. С. 65–70.
3. Хмельницкий А.Ю., Владов М.Л., Капустин В.В. Экспериментальное исследование влияния вмещающего грунта на распространение акустических волн в свайных конструкциях // Инженерные изыскания. 2012. № 6. С. 16–23.
4. Капустин В.В. К вопросу о физических основах акустического метода испытания свай // Инженерные изыскания. 2011. № 11. С. 10–15.
5. Капустин В.В. Акустические методы контроля качества свайных фундаментных конструкций // Разведка и охрана недр. 2008. № 12. С. 1216.
6. Капустин В.В. Применение сейсмических и акустических технологий при исследовании состояния подземных строительных конструкций // Технологии сейсморазведки. 2008. № 1. С. 91–99.
7. Алешин Д.Н., Котова Н.В., Алешина Е.А. Комплекс методов неразрушающего контроля для обследования фундаментов зданий // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2014. № 4 (10). С. 40–42.
8. ASTM D5882–16. Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations.
9. Carino N.J. The Impact-Echo Method: An Overview. Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8611 USA, 2001.

10. Davis A.G. Nondestructive Testing of Wood Piles // Proceeding, Second International Conference on Wood Poles and Piles. 1994, March 21–23; Fort Collins, CO.
11. Xiping Wang, Ross R.J. Nondestructive Evaluation of Standing Trees with a Stress Wave Method // J. Wood and Fiber Science. 2001. 33 (4). P. 522–533.
12. Schubert F., Kohler B., Pfeiffer A. Time Domain Modeling of Axisymmetric Wave Propagation in Isotropic Elastic Media with CEFIT – Cylindrical Elastodynamic Finite Integration Technique // Journal of Computational Acoustics. 2001. V. 9. № 3. P. 1127–1146.
13. Niederleithinger E., Taffe A., Fechner, T. Improved Parallel Seismic Technique for Foundation Assessment // SAGEEP. 2005. Extended Abstracts: Atlanta, USA.
14. Niederleithinger E. Numerical simulation of low strain dynamic pile tests. Proceedings of Stresswave : Lisbon, 2008.

REFERENCES

1. Kapustin V.V. Primenenie volnovykh metodov dlya opredeleniya dliny svaj [Wave methods in determining pile lengths]. *Tekhnologii seismorazvedki*. 2009. No. 2. Pp. 113–117. (rus)
2. Kapustin V.V. Metodika izucheniya osobennostej rasprostraneniya akusticheskikh voln v betonnykh svayah s ispol'zovaniem metodov chislennogo modelirovaniya [Methodology for studying acoustic wave propagation in concrete piles using numerical simulation methods]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 4. Geologiya*. 2008. No. 3. Pp. 65–70. (rus)
3. Hmel'nickij A.Yu., Vladov M.L., Kapustin V.V. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya vmeshchayushchego grunta na rasprostranenie akusticheskikh voln v svajnykh konstrukciyakh [Host soil influence on acoustic wave propagation in pile structures]. *Inzhenernye izyskaniya*. 2012. No. 6. Pp. 16–23. (rus)
4. Kapustin V.V. K voprosu o fizicheskikh osnovakh akusticheskogo metoda ispytaniya svaj [Physical foundations of the acoustic pile test method]. *Inzhenernye izyskaniya*. 2011. No. 11. Pp. 10–15. (rus)
5. Kapustin V.V. Akusticheskie metody kontrolya kachestva svajnykh fundamentnykh konstrukcij [Acoustic methods of quality control of pile foundation structures]. *Razvedka i ohrana neдр*. 2008. No. 12. P. 1216. (rus)
6. Kapustin V.V. Primenenie seismicheskikh i akusticheskikh tekhnologij pri issledovanii sostoyaniya podzemnykh stroitel'nykh konstrukcij [Application of seismic and acoustic technologies in underground building structures]. *Tekhnologii seismorazvedki*. 2008. No. 1. Pp. 91–99. (rus)
7. Aleshin D.N., Kotova N.V., Aleshina E.A. Kompleks metodov nerazrushayushchego kontrolya dlya obsledovaniya fundamentov zdaniy [Non-destructive testing methods for inspection of building foundations]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2014. No. 4 (10). Pp. 40–42. (rus)
8. ASTM D5882 – 16 Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations.
9. Carino N.J. The impact-echo method: An overview. Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8611, USA, 2001.
10. Davis A.G. Nondestructive testing of wood piles. *Proc. 2nd Int. Conf. on Wood Poles and Piles*. 1994. March 21–23. Fort Collins, CO.
11. Xiping Wang, Ross R.J. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. *Wood and Fiber Science*. 2001. V. 33. No. 4. Pp. 522–533.
12. Schubert F., Kohler B., Pfeiffer A. Time domain modeling of axisymmetric wave propagation in isotropic elastic media with CEFIT – Cylindrical Elastodynamic Finite Integration Technique. *Journal of Computational Acoustics*. 2001. V. 9. No. 3. Pp. 1127–1146.
13. Niederleithinger E., Taffe A., Fechner, T. Improved parallel seismic technique for foundation assessment. Extended abstracts of Annual Meeting “The Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems”. Atlanta, USA, 2005.
14. Niederleithinger E. Numerical simulation of low strain dynamic pile tests. Proceedings of Stresswave. Lisbon, 2008

Сведения об авторах

Самарин Дмитрий Геннадьевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sdgsamara@mail.ru

Устюжанин Владимир Леонидович, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tgasu9k@mail.ru

Лобанов Александр Александрович, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, oflaa2010@mail.ru

Authors Details

Dmitry G. Samarin, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sdgsamara@mail.ru

Vladimir L. Ustyuzhanin, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tgasu9k@mail.ru

Aleksandr A. Lobanov, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, oflaa2010@mail.ru