



**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 10, № 3, 2019
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.04
УДК 624.154

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛНОВОЙ ТЕОРИИ УДАРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙ

Я.В. Офрихтер, А.Б. Пономарев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 09 апреля 2019
Принята: 25 июня 2019
Опубликована: 7 октября 2019

Ключевые слова:

свайные фундаменты, волновая теория удара, испытания свай, CAPWAP, PDA, GRLWEAP.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время испытания с использованием волновой теории удара являются распространенной мировой практикой в геотехнике. Они имеют ряд существенных преимуществ, которые делают их применение весьма привлекательным. Тем не менее данный вид испытаний требует тщательной подготовки, внимания к деталям, специфического оборудования и подготовленного технического персонала. Достаточно высокое требование к уровню подготовки инженера для проведения таких испытаний во многом обуславливает нераспространенность данного метода в России. Без понимания физических основ волновой теории инженер может неправильно интерпретировать результаты испытаний или получить заниженные значения несущей способности свай.

Кроме того, известно, что несущая способность свай может изменяться с течением времени, в таких случаях рекомендуются повторные испытания после «отдыха» свай. Еще одной важной позицией является требуемая осадка во время испытания. Согласно ГОСТ 5686 считается, что осадка свай (остаточное перемещение) во время испытания на вертикальную нагрузку, использующего принципы волновой теории удара, должна быть как минимум 2 мм. В противном случае будут получены заниженные значения несущей способности.

Чтобы подтвердить или опровергнуть данные рекомендации, был проведен анализ базы данных ранее выполненных испытаний и существующих исследований, а также анализ выполненных испытаний на строительных объектах Пермского края. В статье представлены выводы по данному анализу и практические рекомендации.

© ПНИПУ

© Пономарев Андрей Будимирович – доктор технических наук, профессор, e-mail: spstf@pstu.ru.
Офрихтер Ян Вадимович – аспирант, e-mail: ian.ofrikhter@gmail.com.

Andrey B. Ponomaryov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: spstf@pstu.ac.ru.
Ian V. Ofrikhter – Postgraduate Student, e-mail: ian.ofrikhter@gmail.com.

USING THE STRESS-WAVE THEORY TO DETERMINE THE BEARING CAPACITY OF PILES

I.V. Ofrikhter, A.B. Ponomaryov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 09 April 2019
Accepted: 25 June 2019
Published: 7 October 2019

Keywords:

deep foundations, wave equation, pile test, CAPWAP, PDA, GRLWEAP.

ABSTRACT

High strain dynamic pile testing is usual practice, and has many benefits that make its use highly attractive. However, it requires careful preparation, specific equipment, attention to detail and testing engineer skill to properly perform these tests. Engineer skills for testing largely determines the non-proliferation of the method in Russia. Without of understanding wave equation analyses, the test engineer may not realize when results are valid, or when capacity results may be only a lower bound.

It is widely known that the capacity of driven piles may change with time after installation and for that reason restrike tests are generally recommended. It is also generally stated that the set per blow should be at least 2 mm, or otherwise the dynamic test may only yield a lower bound solution. To confirm or refute these recommendations, an analysis of the existing test database was conducted, as well as an analysis of the tests performed at the Perm region facilities. The article presents the conclusions of this analysis and practical recommendations.

© PNRPU

За несколько десятилетий, с момента начала исследований по использованию волновой теории удара для испытания свай в 1964 г., была разработана существенная аппаратная база для выполнения подобных испытаний (PDA[®], CAPWAP[®] и др.). Испытания с использованием волновой теории удара (ИИВТУ) стали эффективным инструментом для устройства и испытания забивных свай, а в последние десятилетия также для оценки несущей способности буровых свай. Национальные стандарты различных стран в данной области основаны на ASTM D4945 и признают ценность этого метода – он показывает хорошую сходимость с результатами статических испытаний [1–4] и обладает значительно меньшей стоимостью по сравнению с статическими испытаниями. За счет хорошей сходимости ИИВТУ применяются на крупных ответственных объектах строительства после корреляции со статическими испытаниями и на объектах нормального класса ответственности – как самостоятельный метод с увеличенными коэффициентами запаса. Однако, как и любой другой инструмент, ИИВТУ полезны только в тех случаях, когда испытание выполнено правильно, в соответствии с технологическими регламентами. Далее речь пойдет об основных положениях проведения испытаний.

Технология проведения испытаний. ИИВТУ на данный момент должны следовать указаниям ГОСТ 5686–2012 для получения усилий и скоростей частиц на свае в зоне, как правило, на 2 диаметра ниже головы сваи. Для этого применяются тензометрические датчики и акселерометры. Для определения средних значений необходимо использовать две пары датчиков, расположенных крест-накрест на противоположных сторонах сваи. Такая схема установки датчиков необходима, чтобы нивелировать влияние изгиба при ударе по свае. В случае наличия изгибающих усилий тензометрические датчики показывают разные значения. Несмотря на то что рекомендуется как минимум два акселерометра, при корректной работе датчиков их показания практически идентичны (рис. 1), поэтому в крайнем случае достаточно иметь один корректно работающий акселерометр.

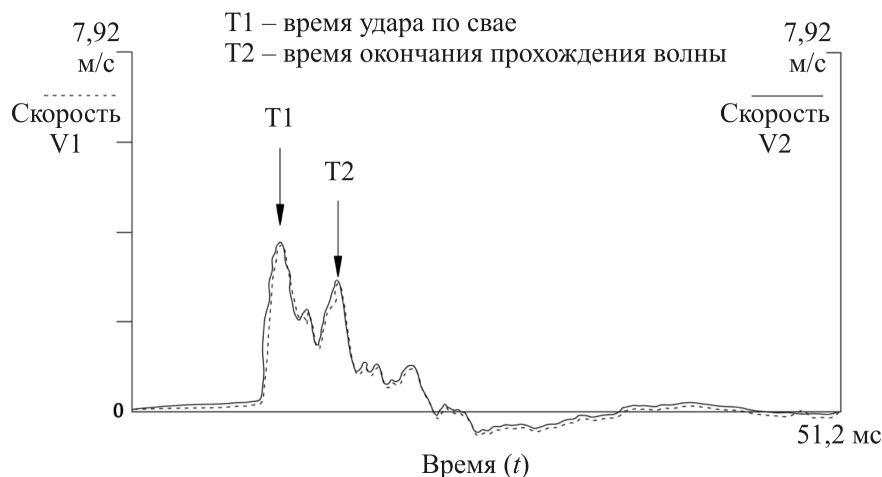


Рис. 1. Показания акселерометров V1 и V2 при испытании
Fig. 1. Indications of accelerometers V1 and V2 while testing

Датчики обычно крепятся к свае болтовым или анкерным соединением. Проскальзывание датчиков во время испытания не допускается. Разница между показаниями тензометрических датчиков должна быть не более 25 %. Запись всегда должна заканчиваться нулевыми значениями усилий и ускорений. Наличие необоснованных скачков говорит о неправильной работе датчиков или неправильном их закреплении.

Обработка результатов. Данные испытаний с использованием волновой теории удара должны обрабатываться специализированным программным обеспечением с поддержкой согласования сигналов (CAPWAP, SIMBAT и т.д.). Хотя существуют разработки и других способов обработки результатов [5, 6], анализ согласования сигналов является общепризнанным и проверенным временем методом.

Суть процедуры «согласование сигналов» заключается в подборе необходимой теоретической кривой усилий и скоростей, которая наилучшим образом будет совпадать с кривой, построенной прямыми измерениями во время испытаний. При этом существует $N + 12$ основных видов подбираемых переменных:

1. N -е количество сопротивлений по боковой поверхности $R(1) \dots R(N_s)$ (в зависимости от разбивки).
2. Сопротивление по острию сваи $R(N_s + 1)$.
3. Упругая деформация по боковой поверхности в стадии нагружения (QS) и разгрузки (CS).
4. Упругая деформация по острию в стадии нагружения (QT) и разгрузки (CT).
5. Коэффициент затухания по боковой поверхности SS.
6. Коэффициент затухания по острию ST.
7. Параметр уровня разгрузки боковой поверхности UN (коэффициент влияния отскока на сопротивление, в диапазоне от 0 до 1).
8. Коэффициент TG, моделирующий возможный зазор между острием и несущим слоем.
9. Модель демпфирования острия: OP = 0 – вязкая, OP = 1 – модель Смита, OP = 2 – модель Смита до момента полной мобилизации статического сопротивления.
10. Модель демпфирования боковой поверхности SO (аналогична OP).
11. Масса грунта, вовлеченного в работу на острие сваи PL.

Сам процесс «согласования сигналов» разделен на 7 основных этапов:

I. Вводятся переменные, определяющие геометрию сваи.

II. Выполняется итерация на участке записи до $2L/C$ (где L – длина сваи, C – скорость волны) путем подбора параметров $R(1) \dots R(N_s)$ и $R(N_s+1)$.

III. Выполняется итерация в точке $2L/C$ и после нее путем изменения параметров $R(N_s+1)$, QT, TG, ST.

IV. Итерацией улучшается сходимость после времени $2L/C$ изменением сопротивления сваи и коэффициентов демпфирования. Процесс возвращается на стадию II.

V. Улучшается сходимость в точке $2L/C$ путем перебора различных параметров ОР. Процесс возвращается на стадию III.

VI. Улучшается сходимость на поздних этапах записи, изменяя параметры CS, CT, UN. Процесс возвращается на стадию II.

VII. Изменяется суммарная несущая способность. Процесс возвращается на стадию II.

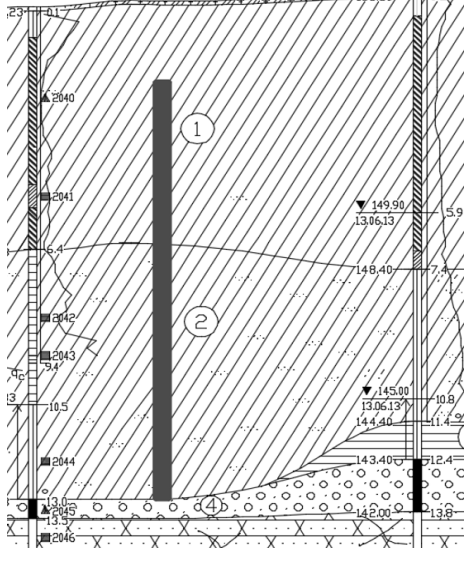
VIII. Проверка необходимости изменения модели сваи: если да – процесс начинается заново.

Для свай с переменным сечением такой метод является обязательным. В случае со сваями с постоянным сечением могут использоваться упрощенные методы, такие как Case Method. Методы, использующие «согласование сигналов», являются более совершенными, так как позволяют более точно прогнозировать статическое сопротивление грунта, вне зависимости от характеристик демпфирования, которые достаточно сложно получить при изысканиях.

Пример получаемых результатов представлен в таблице. Сваи 16 и 25 расположены рядом в одних инженерно-геологических условиях.

Сравнение результатов ИИВТУ с другими методами испытаний

Comparison of the HSDPT with other test methods

Расположение сваи на разрезе	Данные обработки CAPWAP	Данные других испытаний
	Свая № 16 Несущая способность: 2050 кН Несущая способность по острю: 1835 кН Несущая способность по боковой поверхности: 215 кН	Свая № 16, 25 Расчет по СП: 1586 кН Динамические испытания: >1004 кН (осадки менее 2 мм) Статические испытания: >1050 кН
	Свая № 25 Несущая способность: 1947 кН Несущая способность по острю: 1836 кН Несущая способность по боковой поверхности: 104 кН	(достигнут предел прочности сваи по бетону)
<p>ИГЭ 1. Суглинок легкий пылеватый, текучепластичный.</p> <p>ИГЭ 2. Суглинок тугопластичный и полутвердый.</p> <p>ИГЭ 4. Гравийный грунт (с неравномерным содержанием заполнителя, с включением линз различного литологического состава). Согласно СП 50-101–2004 табл. Д.3 приложения Д расчетное сопротивление R_0 принято равным 400 кПа (4,0 кгс/см²)</p>		

Как видно из таблицы, несущая способность сваи значительно превышает 1000 кН при всех видах испытаний. Кроме того, из метода ИИВТУ получено, что основу несущей способности составляет сопротивление по острию, что вполне соотносится с инженерно-геологическими условиями для сваи, где она опирается в крупнообломочные грунты. ИИВТУ проводились без отдыха сваи, непосредственно во время забивки, поэтому отсутствие значимого сопротивления по боковой поверхности с суглинками также является обоснованным.

При проведении расчетов ИИВТУ всегда следует соотносить получаемые результаты с инженерно-геологическим разрезом, так как распределение сопротивления по боковой поверхности имеет множество решений при одних и тех же исходных данных.

Еще одним преимуществом использования алгоритма «согласование сигналов» является возможность получения теоретического графика зависимости осадки от приложенного усилия на сваю. Пример сходимости теоретического графика с данными статических испытаний, выполненных на территории Пермского края, представлен на рис. 2, где видно, что остаточные деформации математической модели и натурального испытания совпадают. Кроме того, ветви нагружения достаточно близки. Следует отметить, что прогноз ИИВТУ (PDA) производился для несущей способности по грунту, которая в данном примере превышает несущую способность сваи. Натурное же испытание было прекращено по достижении несущей способности по материалу.

Существует заблуждение, что обработка «согласование сигналов» должна проводиться с учетом характеристик грунтов. Однако такой порядок расчета делает результаты испытаний бессмысленными по трем основным причинам:

1. ИИВТУ должны давать дополнительную информацию, не зависящую от уже полученной ранее. Это дает возможность сопоставить геологию с результатами испытания. Таким образом можно контролировать распределение сопротивлений по боковой поверхности и острию, а также возникающие напряжения во время забивки.
2. Характеристики грунта при изысканиях и при испытании не согласуются друг с другом вследствие их изменения при устройстве сваи.
3. Ближайшая скважина не всегда корректно определяет реальный грунтовый разрез в месте испытания сваи.

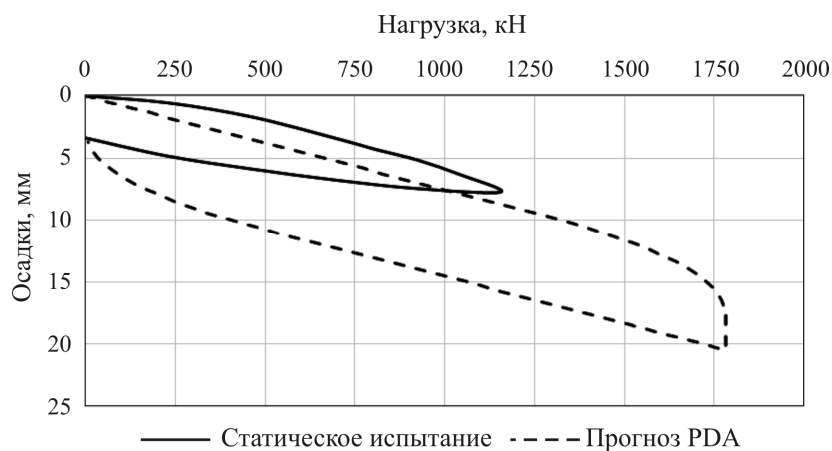


Рис. 2. Сравнение графиков теоретического и реального статических испытаний

Fig. 2. Comparison of theoretical and static field tests graphs

Подбор устройства для удара. В большинстве случаев наилучшие результаты достигаются, когда у сваи есть остаточные перемещения после удара. Для забивных свай при испытании используется тот же копер, которым производилась забивка, так как обычно копер подбирается исходя из анализа волновых уравнений, чтобы избежать лишнего количества ударов [1].

В случаях, когда осадка сваи от удара крайне незначительна или вообще отсутствует, может понадобиться молот с большей энергией удара, чтобы мобилизовать и доказать требуемую несущую способность сваи. На рис. 3 представлена зависимость соотношения результатов CAPWAP и статических испытаний с полученным остаточным перемещением сваи. Статические испытания здесь выполнены по критерию Дэвисона: несущая способность сваи достигается при осадке $S = 3,81 + D/120 + S_{pa}$, мм, где D – диаметр сваи, S_{pa} – сжатие ствола сваи. В целом рекомендуется, чтобы свая получала как минимум 2 мм остаточных деформаций после удара. И хотя представленная выборка не подтверждает этого в явном виде, норма в 2 мм остается хорошим способом гарантии мобилизации сопротивления грунта. В то же время осадки более 8 мм нежелательны, так как это создает дополнительные сложности при анализе и повышает влияние погрешности в определении динамических характеристик на конечный результат. На рис. 2 есть несколько значений с осадкой более 8 мм, и за редким исключением результаты все равно достаточно точные.

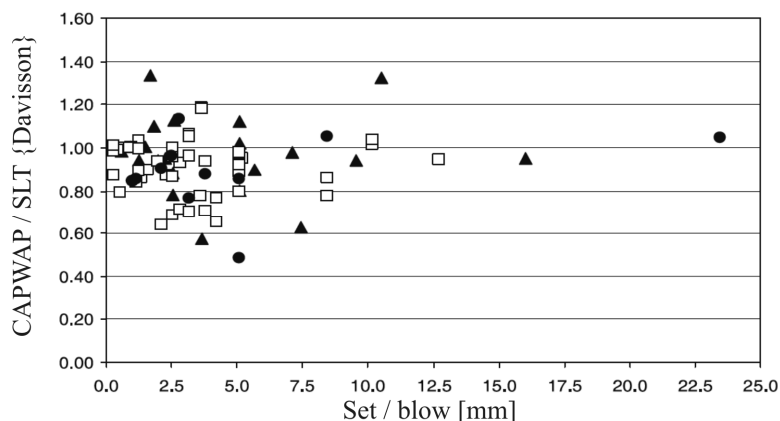
Испытания буровых и набивных свай требуют веса сбрасываемого груза в размере как минимум 1–2 % от требуемой несущей способности [7]. Наилучших результатов можно достигнуть, когда головы сваи и сбрасываемого груза имеют гладкую и ровную поверхность, что позволяет минимизировать локальные концентрации напряжений. Для бетонных и железобетонных свай необходимо использовать прокладки из дерева. Кроме того, при испытании буровых свай большого диаметра рекомендуется выполнять сваю на 1 м или как минимум на 1 диаметр выше проектной отметки. Данное удлинение должно иметь дополнительное внешнее усиление в виде металлической трубы. Создаваемые усилия можно проверить через оборудование сбрасываемого груза акселерометрами и расчета из закона Ньютона ($F = ma$) [8].

В случаях отказа сваи менее 2 мм можно предпринять ряд шагов, чтобы обеспечить корректность результатов. Во-первых, удар с максимальным перемещением должен быть проанализирован в программном комплексе (например, CAPWAP). Если сумма осадки анализируемого удара с предыдущими ударами превышает величину $D/60$ (D – диаметр сваи), то можно считать, что сопротивление грунта мобилизовано [9]. Во-вторых, если свая теряет часть своей несущей способности во время динамических воздействий, можно использовать данные испытаний, выполненных в различное время по принципу «суперпозиции» [10]. В-третьих, в случае буровых свай, когда окружающий грунт находится в разуплотненном состоянии, можно произвести «добивку» сваи серией ударов перед испытаниями. Серия обычно состоит из нескольких ударов с увеличивающейся энергией удара (рис. 3).

Время испытания. В целом время испытания зависит от целей. В случаях когда сваи испытываются для определения возникающих напряжений и подбора более эффективного оборудования, испытания проводятся непосредственно во время забивки. По результатам испытаний можно откорректировать технологический процесс погружения свай. Для железобетонных свай, где растягивающие напряжения могут повлечь за собой возникновение трещин, испытания проводят от начала забивки и до конца. Для металлических свай обычно достаточно лишь конца забивки.

Когда главной целью испытания является определение несущей способности, испытание необходимо проводить после «отдыха» сваи. Существовали попытки определять несущую

щую способность после отдыха по данным по время забивки через энергию удара, однако такой способ до сих пор является крайне неточным [11]. ИИВТУ являются весьма нетрудоемким методом, что позволяет выполнять по несколько испытаний на одной свае в процессе набора или потери несущей способности [12, 13].



□ Диаметр от 13 до 24 дюймов ● Диаметр от 25 до 36 дюймов ▲ Диаметр до 12 дюймов

Рис. 3. Зависимость соотношения CAPWAP и статических испытаний (CAPWAP/SLT) с получаемой осадкой на 1 удар (Set/blow)
Fig. 3. Ratio of CAPWAP to SLT prediction versus permanent set per blow

В заключение следует отметить, что несмотря на то что некоторые вопросы остаются спорными и малоизученными [14, 15], основные требования для корректного ИИВТУ можно сформулировать следующим образом:

1. Данные измерений должны быть хорошего качества. Датчики должны быть плотно закреплены на свае и выдавать корректные значения. Все проверки качества результатов должны быть выполнены перед обработкой. И акселерометры, и тензометрические датчики дублируются.

2. Обработка результатов для определения несущей способности должна производиться в камеральных условиях специализированным программным обеспечением, поддерживающим процедуру «согласования сигналов».

3. Обработка результатов для свай с постоянным сечением с целью получения данных об энергии удара, напряжениях в свае и целостности сваи может производиться непосредственно на площадке.

4. Для получения несущей способности сваи массы ударного груза должно быть достаточно, чтобы передать свае необходимые перемещения.

5. Если энергии удара не хватает, чтобы сообщить свае необходимые перемещения, несущая способность может определяться только по нижней границе.

6. Поскольку несущая способность сваи может изменяться со временем, испытания можно считать корректными только по истечении срока отдыха сваи, который варьируется в зависимости от типа грунтов.

Библиографический список

1. Likins G.E., Rausche F. What Constitutes a Good PDA Test? // Proceedings of the Eighth International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles. – Lisbon, Portugal, 2008. – P. 403–407.

2. Static and Dynamic Load Tests of Shaft and Base Grouted Concrete Piles / Zhou Jialin, Zhang Xin, Jiang Hongsheng, Lyu Chunhao // *Advances in Civil Engineering*. – 2017. – Vol. 23. – P. 1–17. DOI: 10.1155/2017/2548020
3. Moayedi H., Mosallanezhad M., Nazir R. Evaluation of Maintained Load Test (MLT) and Pile Driving Analyzer (PDA) in Measuring Bearing Capacity of Driven Reinforced Concrete Piles // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2017. – № 53. – P. 150–154. DOI 10.1007/s11204-017-9449-1
4. Budi G.S., Kosasi M., Wijaya D.H. Bearing capacity of pile foundations embedded in clays and sands layer predicted using PDA test and static load test // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 125. – P. 406–410. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.101
5. Maizir H., Suryanita R. Evaluation of axial pile bearing capacity based on pile driving analyzer (PDA) test using Neural Network // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/106/1/012037
6. Application of artificial neural network for predicting shaft and tip resistances of concrete piles / E. Momeni, R. Nazir, D.J. Armaghani, H. Maizir // *Earth Sciences Research Journal*. – 2015. – № 19. – P. 85–93. DOI: 10.15446/esrj.v19n1.38712
7. Hussein M.H., Likins G.E., Rausche F. Selection of a Hammer for High-Strain Dynamic Testing of Cast-in-Place Shafts // *Fifth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles (STRESSWAVE '96)*. – Orlando, Florida, 1996.
8. Dynamic Load Testing of Drilled Shafts at National Geotechnical Experimentation Sites / B. Robinson, F. Rausche, G.E. Likins, C. Ealy // *Deep Foundations 2002. – An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance*, Geotechnical Special Publication No. 116; M.W. O'Neill, F.C. Townsend (eds.), American Society of Civil Engineers. – Orlando, Florida, 2002. – P. 1–17.
9. Rausche F., Likins G.E., Hussein M.H. Analysis of Post-Installation Dynamic Load Test Data for Capacity Evaluation of Deep Foundations // *Conference: Symposium Honoring Dr. John H. Schmertmann for His Contributions to Civil Engineering at Research to Practice in Geotechnical Engineering Congress*. – 2008. – P. 312–330. DOI: 10.1061/40962 (325) 8
10. Hussein M.H., Sharp M., Knight W.F. The Use of Superposition for Evaluating Pile Capacity // *Conference: International Deep Foundations Congress*. – 2002. – P. 6–21. DOI: 10.1061/40601(256)2
11. Rausche F., Robinson B., Likins G. On the Prediction of Long Term Pile Capacity From End-of-Driving Information // *American Society of Civil Engineers*. – 2004. – P. 77–95. DOI: 10.1061/40743(142)5
12. Chatterjee K., Choudhury D., Rao V.D. Dynamic analyses and field observations on piles in kolkata city // *Geomechanics and Engineering*. – 2015. – № 8. – P. 415–440. DOI: 10.12989/gae.2015.8.3.415
13. Rojas M., Miquilena I., Souza A. Offshore pile driving foundations monitored by PDA® Test at Puente Nigale // *In Multi-Span Large Bridges*. – 2015. – P. 715–720. DOI: 10.1201/b18567-90
14. Rausche F., Hannigan P., Alvarez C. Soil damping and rate dependent soil strength changes due to impact and rapid loads on deep foundations // *Symposium: Tenth Int. Conf. on Stress Wave Theory and Testing of Deep Foundations, 27–29 June*. – San Diego, California, 2018. – P. 3–9.
15. Bougataya Y., Stuedlein A.W. Region-specific calibration of resistance factors for use with static and wave equation analyses of driven piles // *DFI Journal*. – 2016. – № 10. – P. 143–152. DOI: 10.1080/19375247.2017.1295195

References

1. Likins G.E., Rausche F. What Constitutes a Good PDA Test? *Proceedings of the Eighth International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles*. Lisbon, Portugal, 2008, pp. 403-407.
2. Zhou Jialin, Zhang Xin, Jiang Hongsheng, Lyu Chunhao. Static and Dynamic Load Tests of Shaft and Base Grouted Concrete Piles. *Advances in Civil Engineering*, 2017, vol. 23, pp. 1-17. DOI: 10.1155/2017/2548020.
3. Moayed H., Mosallanezhad M., Nazir R. Evaluation of Maintained Load Test (MLT) and Pile Driving Analyzer (PDA) in Measuring Bearing Capacity of Driven Reinforced Concrete Piles. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2017, no. 53, pp. 150-154. DOI 10.1007/s11204-017-9449-1.
4. Budi G.S., Kosasi M., Wijaya D.H. Bearing capacity of pile foundations embedded in clays and sands layer predicted using PDA test and static load test. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 125, pp. 406-410. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.101.
5. Maizir H., Suryanita R. Evaluation of axial pile bearing capacity based on pile driving analyzer (PDA) test using Neural Network. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, DOI: 10.1088/1755-1315/106/1/012037.
6. Momeni E., Nazir R., Armaghani D.J., Maizir H. Application of artificial neural network for predicting shaft and tip resistances of concrete piles. *Earth Sciences Research Journal*, 2015, no. 19, pp. 85-93. DOI: 10.15446/esrj.v19n1.38712.
7. Hussein M.H., Likins G.E., Rausche F. Selection of a Hammer for High-Strain Dynamic Testing of Cast-in-Place Shafts. *Fifth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles (STRESSWAVE '96)*. Orlando, Florida, 1996.
8. Robinson B., Rausche F., Likins G.E., Ealy C. Dynamic Load Testing of Drilled Shafts at National Geotechnical Experimentation Sites. *Deep Foundations 2002. An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance, Geotechnical Special Publication*, No. 116. Orlando, Florida, 2002, pp. 1-17.
9. Rausche F., Likins G.E., Hussein M.H. Analysis of Post-Installation Dynamic Load Test Data for Capacity Evaluation of Deep Foundations. *Conference: Symposium Honoring Dr. John H. Schmertmann for His Contributions to Civil Engineering at Research to Practice in Geotechnical Engineering Congress*, 2008, pp. 312-330. DOI: 10.1061/40962 (325) 8.
10. Hussein M.H., Sharp M., Knight W.F. The Use of Superposition for Evaluating Pile Capacity. *Conference: International Deep Foundations Congress*, 2002, pp. 6-21. DOI: 10.1061/40601 (256) 2
11. Rausche F., Robinson B., Likins G. On the Prediction of Long Term Pile Capacity From End-of-Driving Information. *American Society of Civil Engineers*, 2004, pp. 77-95. DOI: 10.1061/40743 (142) 5.
12. Chatterjee K., Choudhury D., Rao V.D., S.P, M. Dynamic analyses and field observations on piles in kolkata city. *Geomechanics and Engineering*, 2015, no. 8, pp. 415-440. DOI: 10.12989/gae.2015.8.3.415.
13. Rojas M., Miquilena I., Souza A. Offshore pile driving foundations monitored by PDA® Test at Puente Nigale. *Multi-Span Large Bridges*, 2015, pp. 715-720. DOI: 10.1201/b18567-90.
14. Frank Rausche, Patrick Hannigan, Camilo Alvarez. Soil damping and rate dependent soil strength changes due to impact and rapid loads on deep foundations. *Symposium: Tenth Int. Conf. on Stress Wave Theory and Testing of Deep Foundations*, 27-29 June 2018. San Diego, California, 2018, pp. 3-9.
15. Bougataya Y., Stuedlein A.W. Region-specific calibration of resistance factors for use with static and wave equation analyses of driven piles. *DFI Journal*, 2016, no. 10, pp. 143-152. DOI: 10.1080/19375247.2017.1295195.