



Современные методы испытания грунтов сваями:
Мониторинг погружения забивных свай в режиме
реального времени, как часть реализации метода
«волновой теории удара».

ООО «Технотест»

Москва

1999-2021 г.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

- Работы по устройству свайных фундаментов обязательно включают в себя натурные испытания опытных свай, предусмотренных проектом, позволяющие еще на начальной стадии строительства определить зависимости напряженно-деформированного состояния грунтов основания с несущей способностью рабочих свай и, опираясь на них внести в проект соответствующие изменения. К базовым испытаниям свайных фундаментов, получившим наиболее широкое распространение на территории постсоветского пространства, можно отнести статические и динамические испытания. Статические испытания свай объективно можно назвать наиболее достоверными ввиду натурального моделирования нагружения сваи проектными нагрузками, результатом которых является график перемещения сваи во времени от действующих на нее нагрузок, предусмотренных программой испытаний. Единственным недостатком данного вида испытаний является их дороговизна и высокая трудоемкость. Динамические испытания грунтов сваями с позиции экономии средств более выгодны как по срокам проведения, так и по трудоемкости и стоимости самих испытаний.
- Огромным же недостатком данного вида испытаний является качество и достоверность получаемых результатов. И если сходимость результатов динамических испытаний хорошо изученных грунтов сваями сваебойным оборудованием отечественного производства с результатами других испытаний (например, статического зондирования) обеспечивается, то при использовании сваебойных агрегатов в частности гидравлических молотов зарубежного производства, расчетные значения несущей способности заставляют усомниться в их достоверности. При этом совершенствование методики динамических испытаний в том виде, которая имеется в данный момент в государственном стандарте представляется бессмысленной.

История проблематики

В процессе эволюции свайных работ было предложено множество эмпирических способов определения несущей способности свай на основании «отказа» (перемещение сваи от одного удара), измеряемого при ударе по свае грузом известной массы и высоты падения. Однако невысокая точность результатов таких работ, основанных на вариациях закона сохранения энергии

$QH = A + B + C$, где QH — работа, произведенная падением груза весом Q с высоты H ; A — работа, затраченная на погружение сваи в грунт на величину ее неупругого (остаточного) отказа, связанная с неупругими деформациями грунта, выпором грунта из-под сваи и трением по боковой поверхности; B — работа, связанная с упругими деформациями грунт и сваи, постепенно прекращающимися с окончанием ударной нагрузки; C — работа, затраченная на неупругие деформации материала самой сваи, требовала использования больших коэффициентов надежности, что снижало эффективность применения метода.

Одной из самых старых формул, применяемых при динамических испытаниях, является соотношение, представленное Веллингтоном в 1892 г. Формула определения несущей способности свай Веллингтона, воплотила идею прямой зависимости энергии падающего молота и несущей способности. Впоследствии соотношение претерпело достаточно много модификаций (например, А. Хили, 1925; Н. Янбу, 1954).

$$Q_a = \frac{WH}{F(S + C)}$$

Q_a — допустимая нагрузка, F — коэффициент запаса, W — вес молота, H — высота падения молота, S — средняя величина отказа сваи на удар, C — эмпирическая константа.

История проблематики

В течении 20 века постепенно сформировался научный подход к решению задачи определения несущей способности свай по отказу, основанный на законах сохранения энергии и общих законах механики. В частности этот подход был развит в работах Н.М. Герсеванова, который получил аналитические зависимости между отказом и динамическим сопротивлением сваи для трех случаев: сопротивление приложено к острию сваи, сопротивление приложено к боковой поверхности сваи, сопротивление приложено к боковой поверхности и острию сваи. Однако практическое применение этого подхода было связано с необходимостью измерения скорости в полевых условиях и определения длительности осадки сваи от удара, что требовало наличие соответствующего измерительного оборудования. Можно предположить, что именно с отсутствием подобного оборудования связан тот факт, что новые идеи Н.М. Герсеванова в свое время не получили развития в нашей стране.

История проблематики

В 70-х годах 20-го века в США в Case Western Reserve University (г. Кливленд, штат Огайо) и созданной при участии его выпускников Дж. Бейма (G. Beim), Г. Ликинса (G. Likins), фирме Pile Dynamic, Inc. был разработан метод определения несущей способности забивных свай в процессе их погружения — «Case Method». Данный метод опирается на измерения в процесс погружения сваи деформации и скоростей перемещения частиц материала сваи на уровне ее оголовка в момент каждого удара. Зарегистрированные кривые изменения деформации во время каждого удара и ускорения частиц оголовка сваи пересчитываются в графики изменения напряжения и скорости. По характерным точкам кривых, соответствующим активации сопротивления грунтов по боковой поверхности сваи и под ее нижним концом, возможна оценка сопротивления сваи погружению.

Для проведения измерений был разработан аппаратный комплекс Pile Driving Analyzer (PDA). На данный момент в мире уже существует, как минимум 5 производителей аналогичного оборудования.



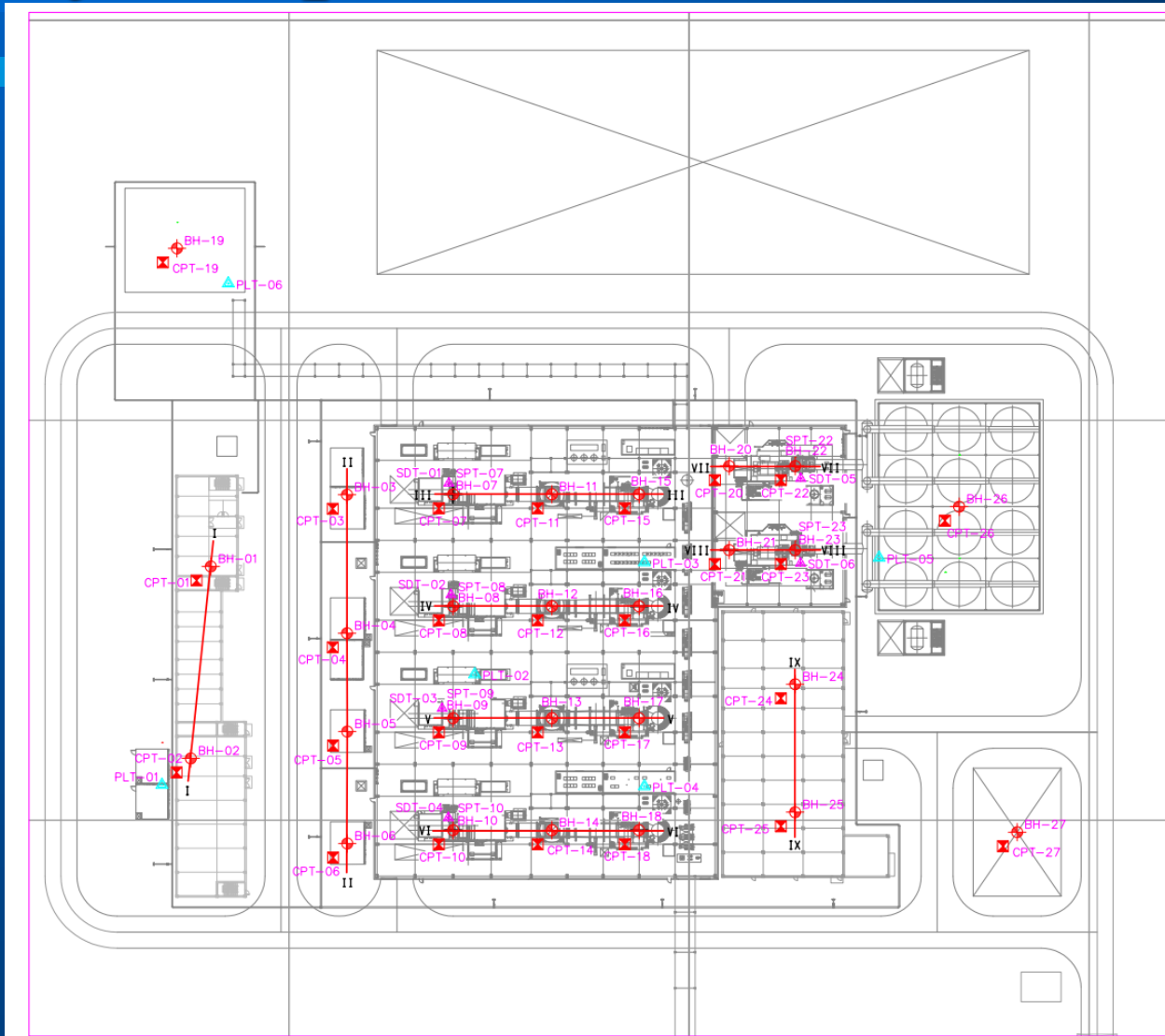
История проблематики





В 70-х годах 20-го века в США в Case Western Reserve University (г. Кливленд, штат Огайо) и созданной при участии его выпускников Дж. Бейма (G. Beim), Г. Ликинса (G. Likins), фирме Pile Dynamic, Inc. был разработан метод определения несущей способности забивных свай в процессе их погружения — «Case Method». Данный метод опирается на измерения в процесс погружения сваи деформации и скоростей перемещения частиц материала сваи на уровне ее оголовка в момент каждого удара. Зарегистрированные кривые изменения деформации во время каждого удара и ускорения частиц оголовка сваи пересчитываются в графики изменения напряжения и скорости. По характерным точкам кривых, соответствующим активации сопротивления грунтов по боковой поверхности сваи и под ее нижним концом, возможна оценка сопротивления сваи погружению.

Для проведения измерений был разработан аппаратный комплекс Pile Driving Analyzer (PDA).

В США в настоящее время действует стандарт ASTM D4945, регламентирующий данный вид испытаний, так же во множестве других стран действуют аналогичные стандарты для мониторинга погружения забивных свай. Российский ГОСТ 5686 п.8.4 Проведение контрольного испытания сваи на вдавливающую нагрузку методом, использующим принципы волновой теории удара. Метод испытаний с использованием принципов волновой теории удара предназначается для оценки сопротивления буровых, набивных и забивных вертикально расположенных свай на вдавливающую нагрузку по результатам определения силового и скоростного их отклика на удар в осевом направлении, нанесенный сваебойным молотом по верхнему торцу сваи. При этом в процессе испытаний предусматривается получение данных о действующей силе по регистрируемым значениям деформаций ствола сваи и об ускорении и скорости ее перемещения под воздействием ударного нагружения.

Суть проблематики



-  : BH (BORING HOLE)
SPT (STANDART PENERATION TEST)
-  : CPT (CONE PENERATION TEST)
-  : SDT (SEISMIC DOWN-HOLE TEST)
-  : PLT (PLATE LOAD TEST)

Суть проблематики



Решение проблемы:

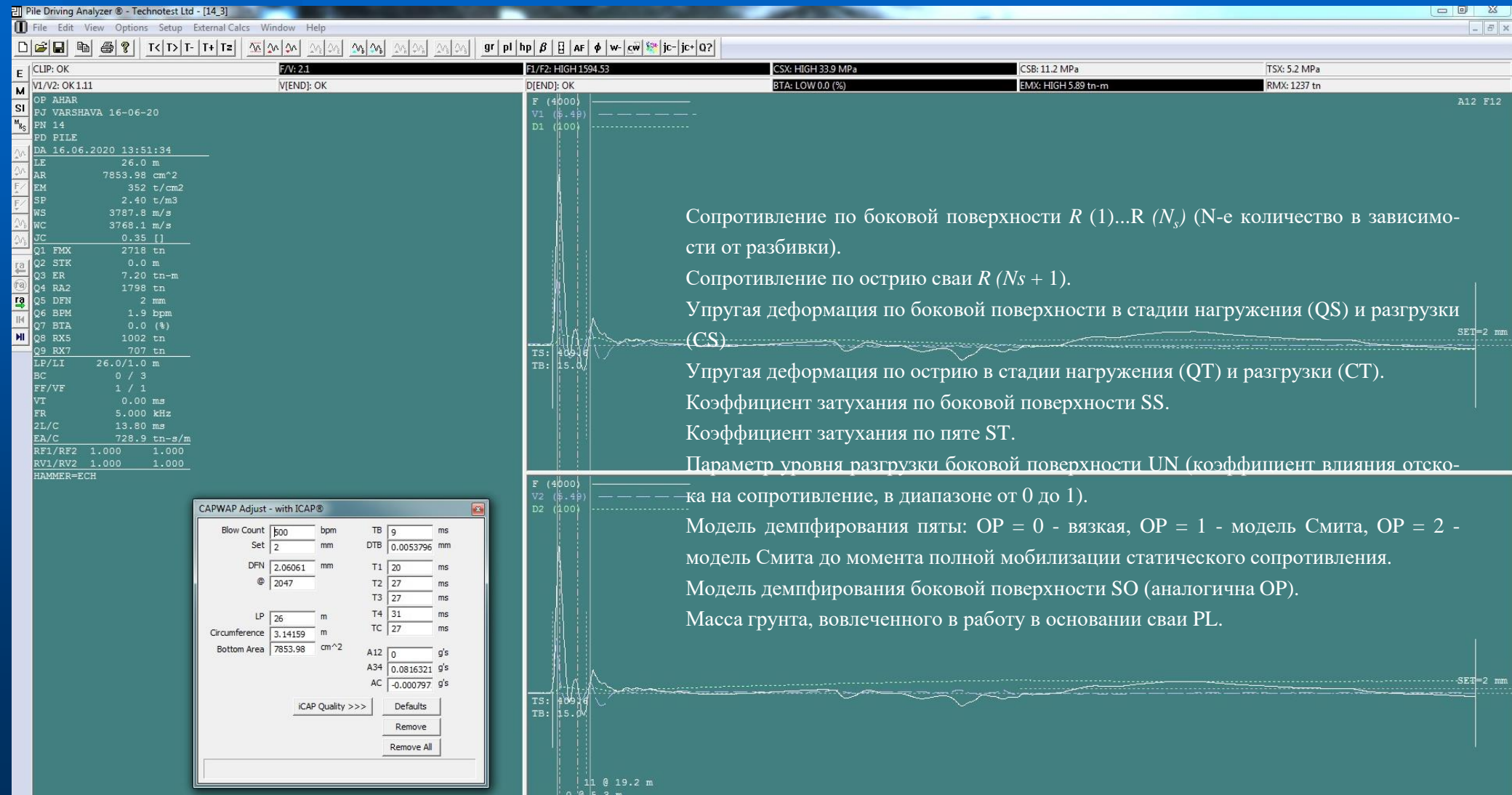
Помимо стандартного определения несущей способности свай по ГОСТ 5686, метод испытания свай в процессе погружения используют для решения оптимизационных задач на начальном этапе строительства: подбора молота и параметров погружения свай, оптимальных размеров свай, контроля напряжений в сваях с целью предупреждения (особенно важно контролировать растягивающие напряжения для ж/б свай, т.к. как увеличенные напряжения приводят к образованию скрытых трещин) их разрушения во время забивки.



Решение проблемы:



Решение проблемы:



Сопротивление по боковой поверхности $R (1) \dots R (N_s)$ (N_s -е количество в зависимости от разбивки).

Сопротивление по острию сваи $R (N_s + 1)$.

Упругая деформация по боковой поверхности в стадии нагружения (QS) и разгрузки (CS)

Упругая деформация по острию в стадии нагружения (QT) и разгрузки (CT).

Коэффициент затухания по боковой поверхности SS.

Коэффициент затухания по пяте ST.

Параметр уровня разгрузки боковой поверхности UN (коэффициент влияния отскока на сопротивление, в диапазоне от 0 до 1).

Модель демпфирования пяты: OP = 0 - вязкая, OP = 1 - модель Смита, OP = 2 - модель Смита до момента полной мобилизации статического сопротивления.

Модель демпфирования боковой поверхности SO (аналогична OP).

Масса грунта, вовлеченного в работу в основании сваи PL.

Решение проблемы:

ATYRAU 26.04.16; File: PTP1.2 Test: 27-Apr-2016 15:02:
 FILE; Blow: 217 CAPWAP (R) 2006-3
 Technotest Ltd OP: AHAR

CAPWAP SUMMARY RESULTS

| Total CAPWAP Capacity: 229.2; along Shaft 153.2; at Toe 76.0 tons | | | | | | | | | |
|---|---------------------|---------------------|---------|--------------------|----------------|-----------------------------|---|----------------------|--|
| Soil Sgmt No. | Dist. Below Gages m | Depth Below Grade m | Ru tons | Force in File tons | Sum of Ru tons | Unit Resist. (Depth) tons/m | Unit Resist. (Area) tons/m ² | Smith Damping Factor | |
| 1 | 3.0 | 1.5 | 16.6 | 212.6 | 16.6 | 11.04 | 6.90 | 0.481 | |
| 2 | 5.0 | 3.5 | 29.9 | 182.7 | 46.5 | 14.96 | 9.35 | 0.481 | |
| 3 | 7.0 | 5.5 | 35.8 | 146.9 | 82.3 | 17.91 | 11.19 | 0.481 | |
| 4 | 9.0 | 7.5 | 31.3 | 115.5 | 113.6 | 15.67 | 9.79 | 0.481 | |
| 5 | 11.0 | 9.5 | 39.6 | 75.9 | 153.2 | 19.79 | 12.37 | 0.481 | |
| Avg. Shaft | | | 30.6 | | | 16.13 | 10.08 | 0.481 | |
| Toe | | | 76.0 | | | | 474.69 | 0.123 | |

| Soil Model Parameters/Extensions | Shaft | Toe |
|--------------------------------------|-------|-------|
| Quake (mm) | 1.040 | 6.667 |
| Case Damping Factor | 0.158 | 0.020 |
| Unloading Quake (% of loading quake) | 30 | 100 |
| Reloading Level (% of Ru) | 100 | 100 |
| Unloading Level (% of Ru) | 0 | |
| Soil Plug Weight (tons) | | 5.25 |

CAPWAP match quality = 4.20 (Wave Up Match); RSA = 0
 Observed: final set = 30.000 mm; blow count = 33 b/m
 Computed: final set = 34.311 mm; blow count = 27 b/m
 max. Top Comp. Stress = 0.154 tons/cm² (T= 34.3 ms, max= F (1500) V (6.97))
 max. Comp. Stress = 0.154 tons/cm² (Z= 1.0 m, T= 34)
 max. Tens. Stress = -0.004 tons/cm² (Z= 1.0 m, T= 77)
 max. Energy (EMX) = 15.87 tonne-m; max. Measured Top D

TG: 51.2
 TB: 9.4

F3 (1500)
 F4 (1500)

TG: 51.2
 TB: 9.4

Calculated at Bottom: CSB = 264 MPa (38.2 ksi)

ATYRAU 26.04.16; File: PTP1.2 Test: 27-Apr-2016 15:02:
 FILE; Blow: 217 CAPWAP (R) 2006-3
 Technotest Ltd OP: AHAR

EXTREMA TABLE

| File Sgmt No. | Dist. Below Gages m | max. Force tons | min. Force tons | max. Comp. Stress tons/cm ² | max. Tens. Stress tons/cm ² | max. Trnsfd. Energy tonne-m | max. Veloc. m/s | max. Displ. mm |
|---------------|---------------------|-----------------|-----------------|--|--|-----------------------------|-----------------|----------------|
| 1 | 1.0 | 774.6 | -19.4 | 0.154 | -0.004 | 15.87 | 2.0 | 46.759 |
| 2 | 2.0 | 764.3 | -17.2 | 0.152 | -0.003 | 15.87 | 2.0 | 46.700 |
| 3 | 3.0 | 749.6 | -15.2 | 0.149 | -0.003 | 15.87 | 2.0 | 46.636 |
| 4 | 4.0 | 704.4 | -10.6 | 0.140 | -0.002 | 14.59 | 2.0 | 46.576 |
| 5 | 5.0 | 682.9 | -10.8 | 0.136 | -0.002 | 14.59 | 2.0 | 46.511 |
| 6 | 6.0 | 607.4 | -7.9 | 0.121 | -0.002 | 12.28 | 2.0 | 46.458 |
| 7 | 7.0 | 580.4 | -9.6 | 0.115 | -0.002 | 12.28 | 2.0 | 46.400 |
| 8 | 8.0 | 489.6 | -6.4 | 0.097 | -0.001 | 9.50 | 2.1 | 46.356 |
| 9 | 9.0 | 458.5 | -7.8 | 0.091 | -0.002 | 9.50 | 2.1 | 46.308 |
| 10 | 10.0 | 368.3 | -3.6 | 0.073 | -0.001 | 7.06 | 2.2 | 46.272 |
| 11 | 11.0 | 329.8 | -5.9 | 0.066 | -0.001 | 3.90 | 2.2 | 46.230 |
| Absolute | 1.0 | | | 0.154 | | | (T = 34.3 ms) | |
| | 1.0 | | | | -0.004 | | (T = 77.1 ms) | |

CASE METHOD

| | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| J = | | | | | | | | | | |
| RP | 355.2 | 272.7 | 190.1 | 107.5 | 25.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| RX | 355.2 | 272.7 | 190.1 | 152.5 | 144.2 | 136.9 | 130.4 | 124.6 | 124.5 | 124.3 |
| RU | 355.2 | 272.7 | 190.1 | 107.5 | 25.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

RAU = 122.8 (tons); RA2 = 131.6 (tons)

Corresponding J(RP) = 0.15; J(RX) = 0.15

| | FT1 tons | FMX tons | DMX mm | DFN mm | SET mm | EMX tonne-m | QUS tons |
|--|----------|----------|--------|--------|--------|-------------|----------|
| | 338.7 | 840.2 | 46.953 | 29.993 | 30.000 | 16.1 | 419.4 |

PILE PROFILE AND PILE MODEL

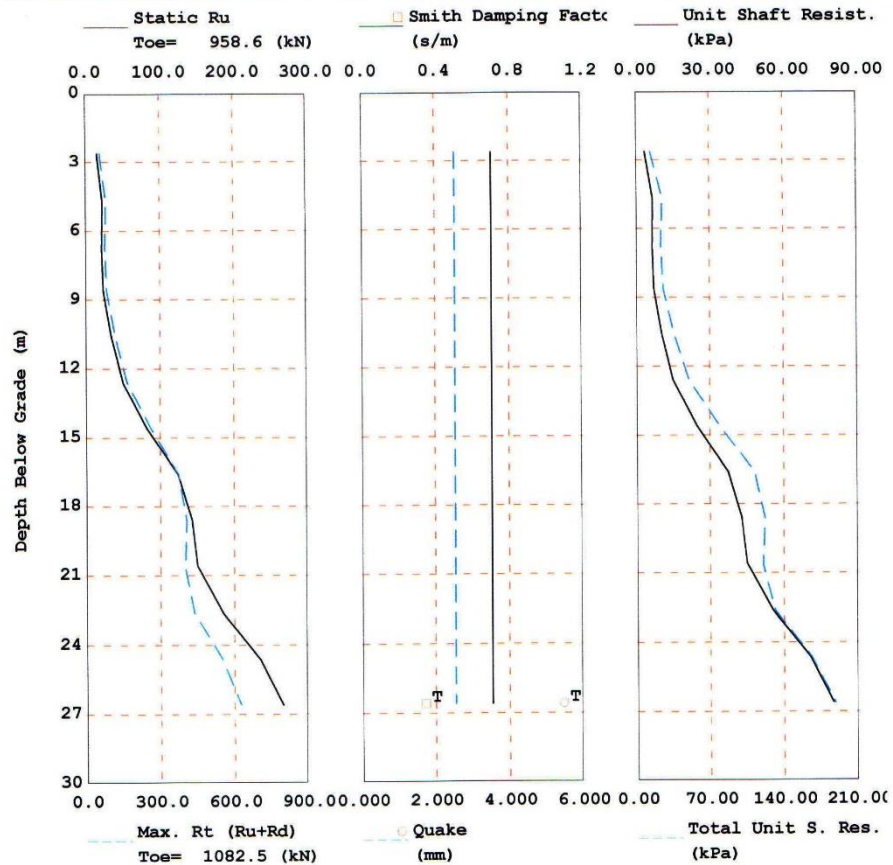
| Area cm ² | E-Modulus tons/cm ² | Spec. Weight tons/m ³ | Perim. m |
|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------|
| 5026.55 | 351.5 | 2.403 | 1.600 |
| 5026.55 | 351.5 | 2.403 | 1.600 |

0.160 m²
 10 m, Top Impedance 466.50 tons/m/s
 Incr 0.264 ms, Wave Speed 3787.8 m/s, 2L/c 5.8 ms

Решение проблемы:

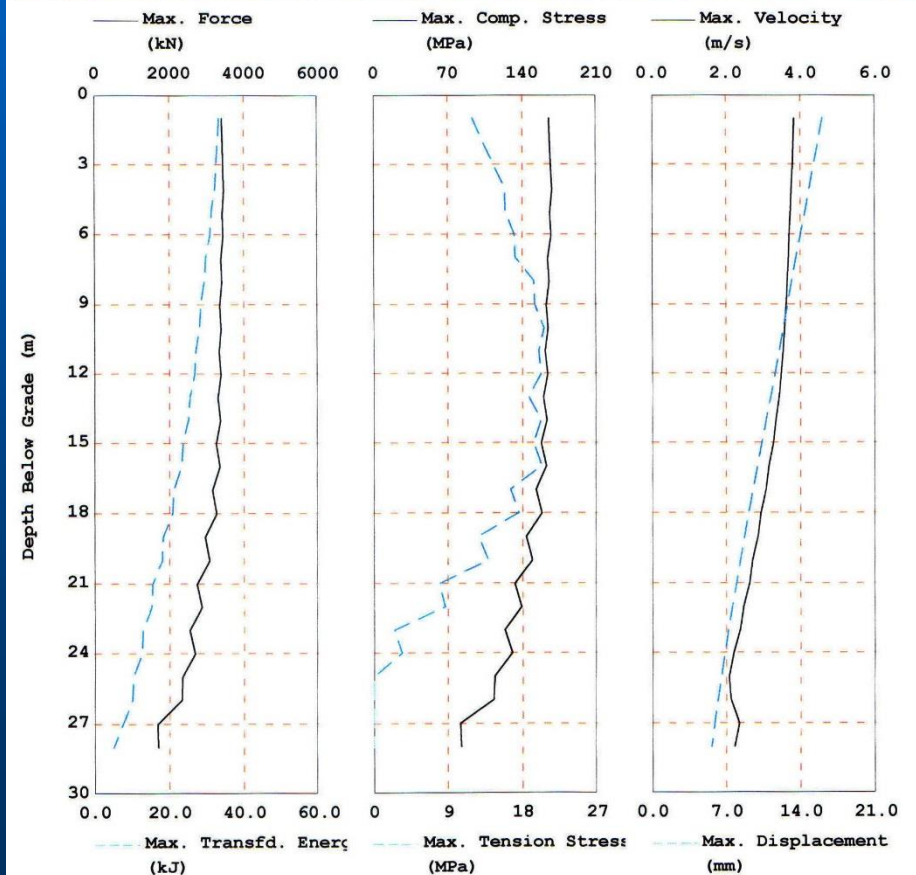
SAHA; File: MOD41'R7
 DRIVEN; Blow: 20
 Technoplast

Test: 12-Sep-2010 06:19:
 CAPWAP(R) 2006
 OP: AHAR



SAHA; File: MOD41'R7
 DRIVEN; Blow: 20
 Technoplast

Test: 12-Sep-2010 06:19:
 CAPWAP(R) 2006
 OP: AHAR



**«Комплекс глубокой переработки ВГО
(1-ый этап). Установка мягкого гидрокрекинга»,
по адресу: г. Волгоград, ул. 40 лет ВЛКСМ, 55.**

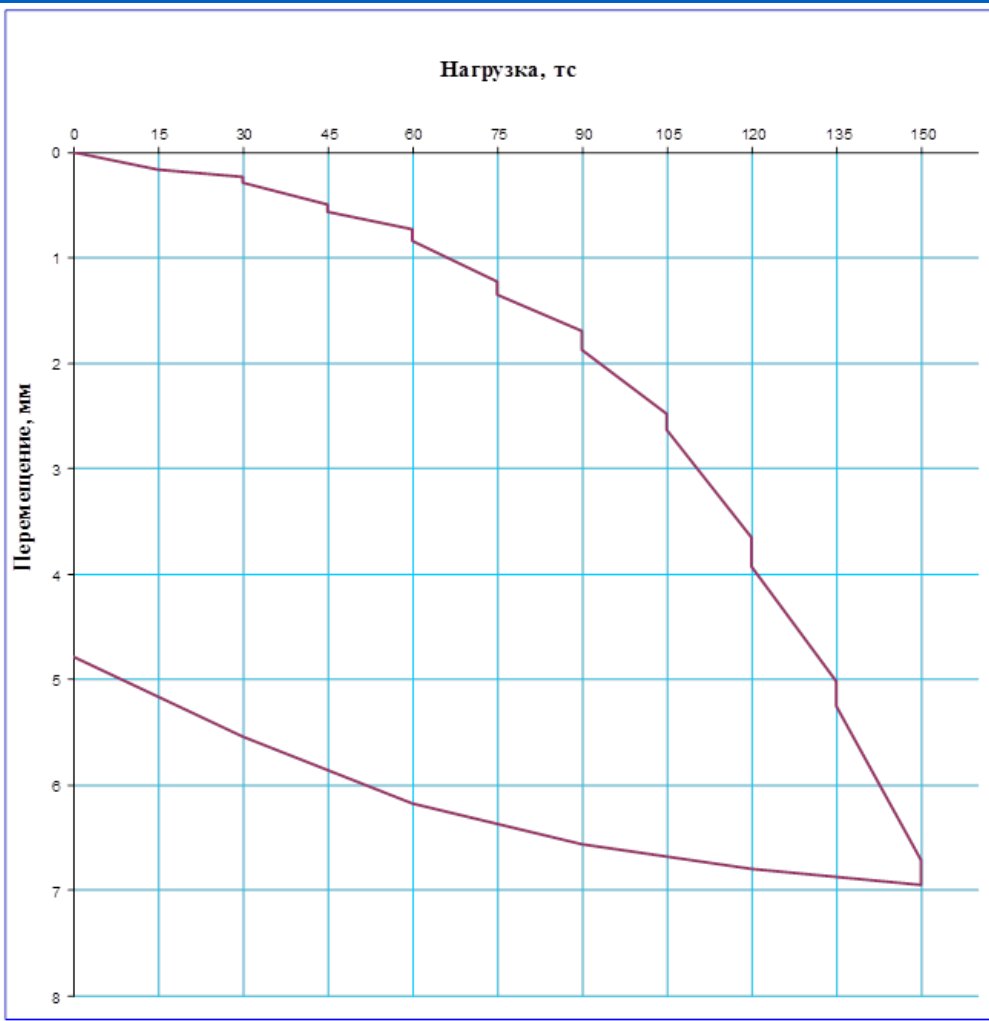
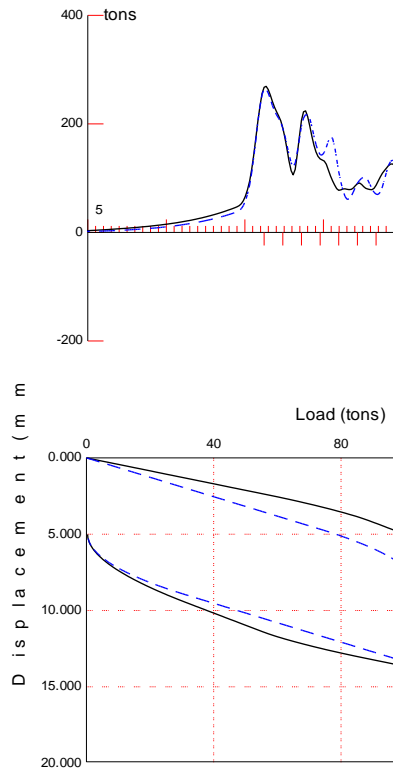
| № сваи | Наименование свай | Глубина погружения, м |
|--------------|-------------------|-----------------------|
| 5-996 | С.90.40.13у | 8 |
| 6-46 | С.90.40.13у | 8 |
| №5-297/5-301 | С.240.35.13у | 16,0 |
| №5-389/5-398 | С.240.35.13у | 23,0 |


Таблица 1. Результаты полученные в программе PDA.

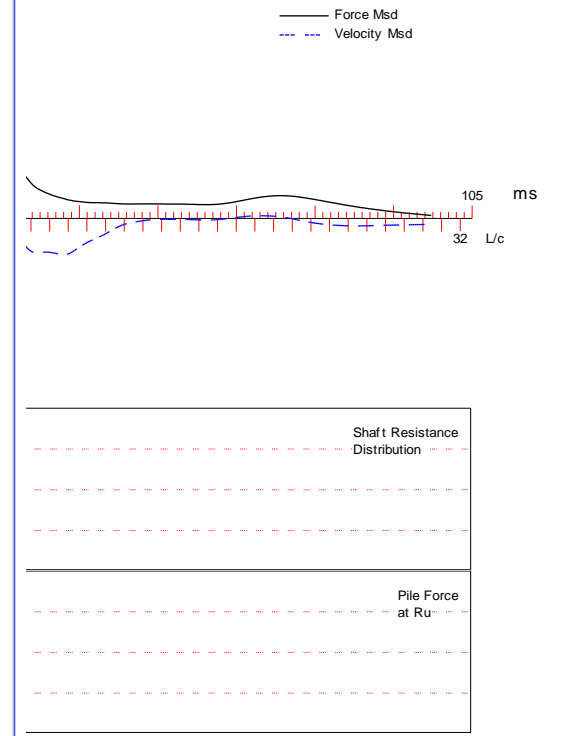
| № | № сваи | Дата испытаний | Длина в грунте (м) | Несущая способность RMX Method Jc=0.5 (тс) | Несущая способность RA2 Method (тс) | Расчетная нагрузка на сваю тс | Общее количество ударов |
|---|-----------|----------------|--------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 1 | 5-996 | 26/09 | 8 | 154,6 | 139,3 | 100 | 174 |
| 2 | 6-46 | 27/09 | 8 | 141,1 | 87,9 | 100 | 138 |
| 3 | №5-297/5- | 27/09 | 16 | 282,2 | 259,9 | 160 | 224 |
| 4 | №5-389/5- | 27/09 | 23 | 223,0 | 219,8 | 160 | 379 |

«Комплекс глубокой переработки ВГО (1-ый этап). Установка мягкого гидрокрекинга», по адресу: г. Волгоград, ул. 40 лет ВЛКСМ, 55.

VOLGOGRAD LUKOIL 26.09.13.; Pile: 1
Technotest Ltd



14-Dec-2013
CAPWAP(R) 2006-3 



**«Комплекс глубокой переработки ВГО
(1-ый этап). Установка мягкого гидрокрекинга»,
по адресу: г. Волгоград, ул. 40 лет ВЛКСМ, 55.**

| № | Номер сваи | Дата испытаний | Длина в грунте | CAPWAP Results | | | Наличие повреждений ствола сваи | |
|---|--------------|----------------|----------------|---|--------------------------|-----------|---------------------------------|--------------|
| | | | | Общая несущая способность | Боковая поверхность сваи | Пята сваи | | |
| | | | м | т | т | т | | |
| 1 | 5-996 | 26/09 | 8 | 144,9 | 40,1 | 104,8 | нет | |
| 2 | 6-46 | 27/09 | 8 | 120,5 | 37,4 | 83,1 | нет | |
| 3 | №5-297/5-301 | 27/09 | 16 | 255,8 | 35,1 | 220,7 | нет | |
| 4 | №5-389/5-398 | 27/09 | 23 | 194,8 | 68,3 | 126,5 | два | |
| | | | | Свая № | 5-996 | 6-46 | №5-297/5-301 | №5-389/5-398 |
| | | | | Частное значение предельного сопротивления сваи, $F_{г,тс}$ | 150,0 | 150,0 | 240,0 | 240,0 |
| | | | | Расчетная несущая способность $F_{д}$, при $\gamma_c=1$ и $\gamma_g=1$, тс, | 150,0 | 150,0 | 240,0 | 240,0 |

Выводы:

1. Результаты выполненных исследований показали, что принятый в Case-методе основанном на волновой теории удара принцип работы системы «свая-грунт» и способ построения графиков зависимости осадок сваи от динамических воздействий, эквивалентных статическим нагрузкам, являются теоретически обоснованными и пригодными для практического применения при погружении забивных свай разного типа.
2. Использование метода волновой теории удара в для мониторинга погружения свай позволяет точно описать процессы, происходящие при забивке сваи. При этом учет множества факторов, влияющих на величину отказа сваи и ее несущую способность, дает возможность использовать особенности динамического события в режиме реального времени.
3. Проведение мониторинга погружения при забивке свай позволяет получить информацию о зависимости несущей способности от глубины погружения, что позволяет оперативно корректировать проектные решения и выбор сваебойного оборудования.