

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ ГРУНТА ПРИ УДАРНОМ ПОГРУЖЕНИИ СВАЙ. ОСНОВНЫЕ СЛЕДСТВИЯ

В. А. ВАСЕНИН – НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект».

Статья посвящена вопросам оценки параметров колебаний грунта при погружении свай. Приводятся результаты численного моделирования системы «молот-амортизатор-свая-грунт». Рассматривается влияние различных факторов на уровень и характер смещений грунтовой среды при забивке свай.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых эффективных способов устройства свайных фундаментов является забивка. Однако данный способ представляет опасность для окружающих зданий, поскольку предполагает значительные динамические воздействия на грунты оснований.

В настоящее время накоплен значительный объем натурных наблюдений за величинами, характером колебаний и повреждениями зданий и сооружений, различающихся по конструктивной схеме, физическому состоянию, возрасту, этажности, расстоянию от погружаемых свай, типу фундамента, грунтовыми условиями и т. п. [5, 13, 18]. Натурные наблюдения позволили приблизительно оценить допустимые параметры колебаний конструкций охраняемых зданий и легли в основу отечественных и зарубежных нормативных документов по проектированию и устройству свайных фундаментов в условиях реконструкции и существующей застройки.

Существующие методики оценки параметров колебаний грунта при погружении свай основываются на эмпирических или полуэмпирических зависимостях, опытных данных [5,6,13,18] и в силу этого весьма осредненно и опосредованно отражают реальную физику явлений, происходящих в грунте. Это во многих случаях не позволяет получить достоверную оценку параметров колебаний грунта в конкретных геологических условиях

площадки. Существующие аналитические решения по определению волновых полей смещений в грунтовой среде достаточно громоздки и не учитывают сложный характер динамического воздействия, значительное количество начальных и граничных условий. Поэтому подобные задачи целесообразно решать численными методами.

1. ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «МОЛОТ-АМОРТИЗАТОР-СВАЯ-ГРУНТ»

Рассмотрим задачу о нахождении волновых полей смещений, скоростей и ускорений грунтовой среды при ударном погружении свай с учетом волнового характера взаимодействия всей системы «молот-амортизатор-свая-грунт» (для случая ударного погружения), участвующей в образовании и распространении колебаний. Построим решение с использованием метода конечных элементов.

Молот. Для моделирования работы молота будем использовать линейные вязкоупругие элементы с заданными начальными условиями: при $t = 0$ (т.е. в момент падения) начальная скорость принимается равной скорости молота V_0 при падении в однородном поле силы тяжести с ускорением свободного падения. В задаче рассматривается один удар молота. Это связано с тем, что при забивке свай в грунтах возникают затухающие колебания длительностью 0,1...0,5 с, в то время как число ударов в минуту дизельных и гидравлических молотов, применяемых в строительстве, не более 70, а молотов свободного падения – не более 5.

© В. А. Васенин, 2003

Internet: www.georec.spb.ru

Моделирование удара в рассматриваемой системе осуществляется при следующих основных допущениях:

взаимодействие между молотом и амортизатором осуществляется посредством прямого центрального удара;

при забивке свай механическими молотами свободного падения удар между взаимодействующими поверхностями может считаться абсолютно неупругим, т.е. рассматривается случай так называемого квазипластического удара, который представляет собой высокочастотный процесс соударения взаимодействующих масс, заканчивающийся их слипанием [9, 11]. Допущение хорошо согласуется с опытными данными;

при забивке свай дизель-молотами необходимо учитывать конечность времени соударения и дополнительные усилия в системе, связанные с расширением, сжатием газа, вспышкой топлива. Конечность времени удара (отрыв молота от амортизатора) и необходимые начальные условия для описания этого процесса можно моделировать в подобных задачах с помощью специального контактного элемента, одновременно играющего роль амортизатора. Потери энергии (трение при движении ударной части, необратимые деформации материала молота, трение в момент удара и т.п.) могут пересчитываться в эквивалентную скорость падения молота в момент удара [14].

Амортизатор. Уровень напряжений, возникающий в теле сваи при ударе молота, и время ударного взаимодействия будут зависеть от материала амортизатора. Расчетные модули упругости амортизаторов назначаются для условий максимума динамических напряжений в системе «свая–амортизатор–молот» для соответствующего амортизационного материала по экспериментальным исследованиям [10, 14].

Свая. Свая моделируется конечными элементами с соответствующими жесткостными характеристиками. Скорость распространения волн в свае можно считать приблизительно равной скорости распространения волн в стержне: $V_{cm} = \sqrt{E/\rho}$.

Грунт. При ударном погружении свай в грунт в зонах, примыкающих к свае, происходит разупрочнение, нарушение структуры грунта вплоть до перехода в вязкотекучее состояние. В процессе погружения грунт

из-под нижнего конца ствола сваи вытесняется и перемещается в зону наименьшего сопротивления [2, 10]. Такие зоны образуются как вокруг ствола сваи, так и ниже ее острия. При этом часть объема вытесненного сваей грунта трансформируется в непосредственный выпор, другая же часть может расходоваться на уплотнение околосвайного пространства. Если глинистый грунт полностью водонасыщен, то в момент ударного нагружения грунтовой среды поровая вода не успевает отжаться из пор, объемная составляющая напряжений полностью воспринимается водой, а сдвиговая – передается на скелет грунта, разрушая его; уплотнения грунта не происходит. Объем вытесненного сваей грунта в этом случае полностью расходуется на выпирание.

После прекращения многоцикловых ударных воздействий, в процессе «отдыха», грунты в пределах околосвайного пространства тиксотропно упрочняются, происходит полное или частичное восстановление первоначальной прочности и, соответственно, увеличение несущей способности погруженных свай. Многочисленные исследования показали, что увеличение несущей способности может происходить в течение 30...40 дней. Поэтому при решении динамических задач восстановлением структуры грунта можно пренебречь, считая процесс расструктурирования в рассматриваемом промежутке времени необратимым.

2. МОДЕЛЬ ГРУНТА

Расструктурирование грунта околосвайного пространства значительно изменяет характер работы сваи как источника сейсмической энергии, распространяющейся в виде механических колебаний грунтовой среды.

Для учета нелинейных явлений, происходящих в грунте вокруг погружаемого элемента, используется модель упруговязкопластической среды. Она является развитием известной вязкоупругой модели среды Кельвина–Фойгта, широко применяемой в расчетах оснований зданий и сооружений (гидросооружений) на сейсмические воздействия, фундаментов машин с динамическими нагрузками и т.п.

В отличие от тела Кельвина–Фойгта предложенная модель предполагает упруго-

вязкопластическую реакцию на девиаторную составляющую деформаций (рис. 1): при $\tau < \tau_{пр}$ девиаторная реакция среды вязкоупругая; при $\tau > \tau_{пр}$ – вязкопластическая.

Объемная реакция грунтовой среды в расчетах принимается упругой (вязкая компонента реакций на гидростатическую составляющую напряжений введена для моделирования демпфирующих свойств среды при распространении продольных волн).

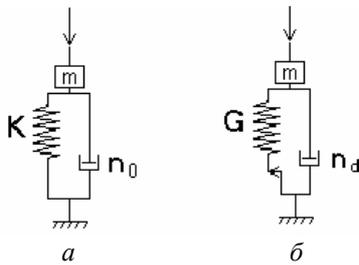


Рис. 1. Реакция среды на гидростатическую (а) и девиаторную (б) компоненты

Величина касательных напряжений ограничивается прочностными свойствами среды. Описание предельных поверхностей, ограничивающих области прочности, в случае осесимметричного деформированного состояния осуществляется с помощью критерия Треска–Сен-Венана:

$$\sigma_1 - \sigma_3 - 2C = 0, \quad (1)$$

где σ_1, σ_3 – компоненты главных напряжений; C – параметр прочности грунта, зависящий от генезиса и природного напряженного состояния массива.

Приближенно параметр прочности можно записать в виде

$$C = \sigma_0 \tan(\varphi) + c, \quad (2)$$

где φ – угол внутреннего трения; c – величина удельного сцепления грунта; σ_0 – объемные напряжения от собственного веса грунта.

Главные напряжения в (2) вычисляются для упругого компонента тензора напряжений. Зависимость между сдвиговыми деформациями и касательными напряжениями по рассматриваемой модели изображена на рис. 2.

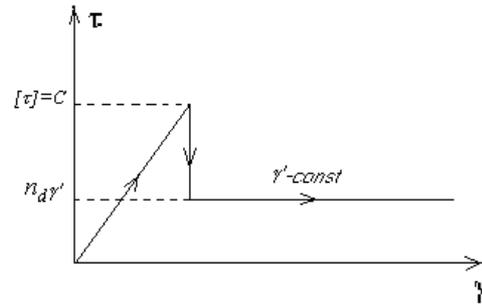


Рис. 2. Деформационная характеристика модели

В предлагаемой модели на стадии упругой работы грунта ($\tau < C$) неизвестные функции смещений аппроксимируются линейными полиномами. В предельном состоянии ($\tau > C$) модель предполагает равнообъемное течение. Как показывает практика, линейные симплексы при моделировании работы грунта на стадии пластических деформаций при определенных граничных условиях приводят к необоснованному затуханию деформаций в процессе течения, что вызвано математическими свойствами функций формы. Поэтому аппроксимирующие полиномы на стадии пластического течения принимаются в виде

$$u = a_1 + a_2 r + a_3 z + a_6 r z; \quad (3)$$

$$w = a_4 + a_5 r - \left(\frac{a_1}{r_0} + 2a_2 + a_3 \frac{z_0}{r_0} + a_6 z_0\right) z - \frac{a_6 z^2}{2}; \quad (4)$$

$$r_0 = (r_1 + r_2 + r_3)/3; \quad z_0 = (z_1 + z_2 + z_3)/3; \quad (5)$$

$$r = r_1 L_1 + r_2 L_2 + r_3 L_3;$$

$$z = z_1 L_1 + z_2 L_2 + z_3 L_3; \quad L_1 + L_2 + L_3 = 1,$$

где $a_1 \dots a_6$ – вектор констант полинома;

$r_1 \dots r_3$ – узловые координаты элемента; u, w – компоненты смещений вдоль координатных осей r и z ; $L_1 \dots L_3$ – L – координаты элемента.

Свойством выражений является то, что они удовлетворяют условию равнообъемного течения:

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{u_0}{r_0} = 0 \quad (6)$$

Предполагается, что, если элемент на каком-либо шаге во времени выходит в предельное состояние, он остается в этом состоянии до конца расчета, независимо от характера

напряженного состояния (восстановление структуры не моделируется). Подобная модель грунта вполне соответствует реальным явлениям, происходящим в грунте при вибропогружении свай или шпунта [1, 2, 15].

Зависимость коэффициента вязкости от ускорения может быть выражена уравнением изменения вязкости, аналогичным зависимости, предложенной Н. Н. Масловым, Д. Д. Барканом [1, 4]:

$$\eta(a) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) e^{-\frac{\gamma a}{g}}, \quad (7)$$

где η_0, η_{∞} – начальные и конечные значения коэффициентов вязкости; a – ускорение колебаний грунта; g – ускорение свободного падения; γ – коэффициент, определяющий степень расструктурирования среды.

Аналогичная зависимость, описывающая снижение боковых сопротивлений свай и шпунта при вибропогружении (извлечении), была использована Н. А. Преображенской при описании результатов опытов [12].

2. МОДЕЛЬ ГРУНТА

Рассмотрим примеры решения задач о нахождении волновых полей смещений в грунтовой среде при ударном погружении свай. Поскольку свая представляет собой источник, у которого в процессе забивки изменяется глубина погружения (площадь поверхности взаимодействия с грунтом) и, соответственно, характер работы сваи как источника сейсмической энергии, то моделирование процесса ударного погружения и распространения сейсмических волн в грунте осуществляется в несколько этапов. На каждом этапе решается задача с учетом погружения сваи на определенную глубину при единичном ударе молота. Отметка острия сваи увеличивается на каждом этапе. При этом массив грунта каждый раз наследует зону расструктурирования, полученную из предыдущего расчета. Иными словами, процесс погружения сваи моделируется решением ряда дискретных задач.

Фрагмент расчетной схемы для случая осесимметричного деформированного состояния приведен на рис. 3. Для геологических условий площадки, расположенной на Каменном острове в Санкт-Петербурге, характерно

наличие плотного слоя песков (слой 2 на рис. 3), подстилаемого слабыми озерно-ледниковыми отложениями (слои 3,4). Несущим слоем проектируемого свайного основания здания является морена (слой 5). Результаты обработки статического внедрения свайзонда в грунт также приведены на рис. 3, 4.

Забивка сваи длиной 11 м поперечным сечением 35 x 35 см производилась молотом свободного падения массой 3,8 т с высоты 1 м. Нахождение неизвестных (в данном случае волновых полей смещений, скоростей и ускорений) методом конечных элементов осуществлялось для расчетной области размером 50x35 м. Размер расчетной области выбирался из условий обеспечения необходимой точности для оценки волновых полей смещений в областях вокруг сваи, расположенных на удалении до 30 м от источника. Расчетная область дискретизировалась на прямоугольные линейные конечные элементы с наибольшей стороной, равной 0,5 м.

В ближней к свае зоне разбивка элементов производилась еще чаще для более точного учета нелинейных явлений в грунте в процессе погружения сваи. Наибольший размер стороны конечного элемента в этом случае в 10 раз меньше длины волны, распространяющейся в грунтовой среде и соответствующей наибольшему размаху смещений. Таким образом достигалось выполнение основного условия, касающегося размеров конечного элемента, для моделирования процесса распространения нестационарных упругих волн в грунтовой среде.

Решение задачи рассматривалось на период времени, равный 0,5 с. Интегрирование системы дифференциальных уравнений производилось методом Ньюмарка. Для этого рассматриваемый отрезок времени разбивался на 800 временных шагов ($dt < L/c$). Значительное количество временных шагов интегрирования в этом случае было обусловлено тем, что в системе «молот–амортизатор–свая» моделировались ударные процессы.

Для исключения фиктивных отражений от границ условного контура конечноэлементной схемы на границах расчетной области устанавливались граничные условия, предложенные Дж. Лисмером и Л. Кухлмеером [16,17], которые приближенно учитывают рас-

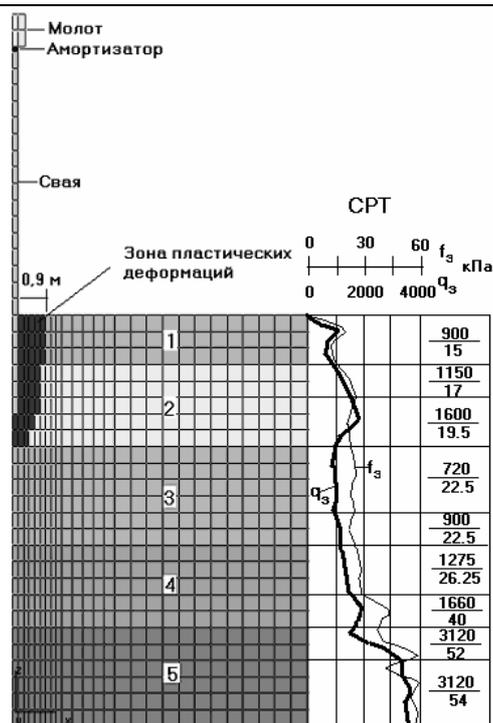


Рис. 3. Численное моделирование процесса распространения волн в грунтовой среде при ударном погружении сваи. Расчетная схема приведена для случая погружения сваи на глубину 3 м. Справа изображены результаты определения сопротивления грунта в острие и по боковой поверхности сваи по методике СРТ

сеяние энергии в соответствии с гипотезой плоского отражения. Согласно этой гипотезе, в расчетной подобласти на границах устанавливаются демпферы с эквивалентными параметрами демпфирования, поглощающие энергию. Важной отличительной особенностью постановки таких граничных условий является то, что они не зависят от частоты продольных и поперечных волн, т.е. допускают прямое интегрирование уравнений движения.

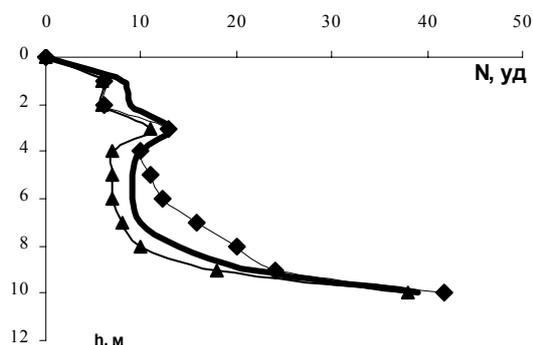


Рис. 4. Количество ударов молота на каждый метр погружения по глубине:
 ■ – прогноз по методике на основе данных СРТ;
 ▲ – по численному решению;
 ● – натурные данные

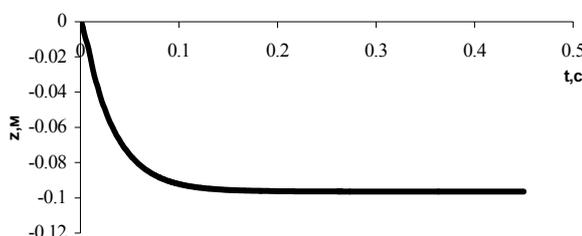


Рис.5. Вертикальное смещение сваи (м) во времени за 1 удар при глубине погружения 3м

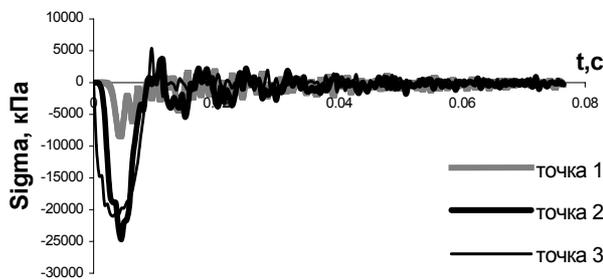
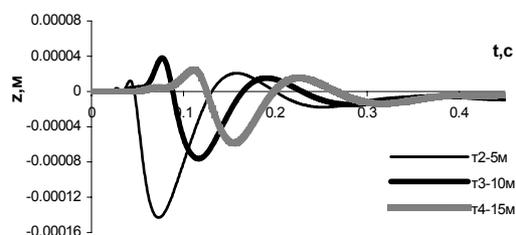


Рис.6. Вертикальные напряжения в свае при ударе. т.1 – в уровне острия сваи; т.2 – в центральной части; т.3 – в голове сваи

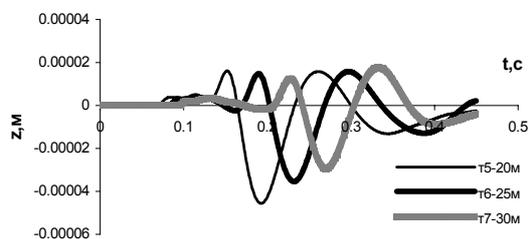


Рис. 7. Теоретические (численные) осциллограммы вертикальных смещений поверхности (м) на различных расстояниях от сваи при глубине погружения 3м

Расчетная модель при вводе исходных данных предполагает назначение плотности среды, коэффициента Пуассона, продольных и поперечных скоростей распространения волн в сплошной среде, параметров вязкости (демпфирования), угла внутреннего трения и величины удельного сцепления. Расчетные параметры модели для каждого слоя грунта (см. рис. 3) приведены в табл. 1. Расчетные скорости распространения продольных и поперечных волн для каждого слоя принимались приближенно по таблицам из различных литературных источников и эмпирическим зависимостям [7].

Скорости распространения и величина затухания волн в грунтовой среде для конкретных геологических условий могут быть установлены с помощью лабораторных (ультразвуковых, резонансных, электродинамических) или полевых сейсмических методов исследования свойств грунтов [7].

Расчетный график вертикального смещения сваи за один удар и напряжения в теле сваи при глубине погружения 3 м приведены на рис. 5, 6. Расчетные осциллограммы смещений (рис.7) по характеру соответствуют натурным записям. Наибольшие амплитуды расчетных вертикальных компонент смещений наблюдаются на частоте ≈ 8 Гц. Характер изменения максимальных амплитуд вертикальных компонент смещений с расстоянием от источника и по глубине грунто-

вого массива приведен на рис. 8, 9. Из рисунков видно, что вертикальные компоненты смещений грунта убывают с расстоянием от погружаемой сваи по экспоненциальному закону (см. рис. 8, 9), который хорошо согласуется с известной зависимостью Б. Б. Голицина [5,6,13]. Затухание указанных компонент смещений с глубиной также носит экспоненциальный характер и во многом повторяет зависимость, предложенную О. А. Савиновым, что подтверждают натурные исследования. Такой характер изменения максимальных амплитуд смещений с расстоянием от источника и по глубине показывает, что наибольшие смещения на поверхности грунтовой среды определяются прохождением рэлеевских волн.

Зависимости максимальных вертикальных амплитуд смещений грунтовой поверхности от положения острия сваи представлены на рис. 10.

Наибольшие зарегистрированные в натурных наблюдениях амплитуды смещений были зафиксированы на этой глубине погружения сваи 3 м от поверхности. Аналогичный характер распределения максимальных амплитуд смещений получился в результате решения ряда задач (см. рис. 10). Увеличение амплитуд колебаний при глубине погружения сваи 3 м объясняется наличием в грунтовой толще относительно плотной прослойки песчаного грунта, для пробивки которого

Таблица 1

Наименование грунта	Мощность слоя, м	Плотность, ρ , т/м ³	Угол внутреннего трения φ	Удельное сцепление c , кПа	Показатель текучести I_L	Скорость продольных волн, м/с	Скорость поперечных волн, м/с	Коэффициент Пуассона μ
Насыпной слой – песок, строительный мусор	1,5	1,85	-	-	-	225	121	0,29
Пески пылеватые, насыщенные водой, средней плотности	2,5	2,06	28	3	-	330	154	0,36
Супеси песчаные, с прослоями песка, пластичные	3	2,03	18	23	0,67	330	122	0,43
Супеси пылеватые, с гравием и галькой, пластичные	2,5	2,16	20	20	0,41	397	140	0,43
Супеси пылеватые, с гравием и галькой, полутвердые	10	2,2	27	50	0,39	520	170	0,44

требуется несколько больше ударов. Условия работы сваи (на небольшой глубине погружения работает преимущественно острие) и наличие в верхних слоях рыхлых насыпных грунтов, на которые приходится большая доля энергии упругих колебаний, определяют наибольший уровень смещений на поверхности.

3. ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для проверки правильности моделирования ударного взаимодействия элементов в рассматриваемой системе можно вычислить уровень напряжений в голове сваи.

Площадь поперечного сечения сваи

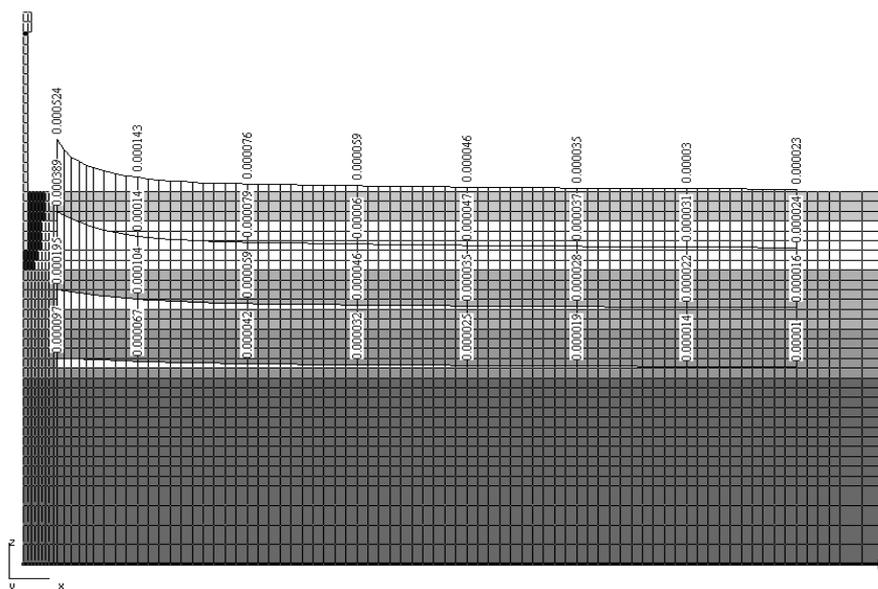


Рис. 8. Эпюры максимальных вертикальных амплитуд смещений (м) грунтовой среды при забивке сваи на глубину 3м от поверхности (подписи приведены на расстоянии 1,5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 м от источника на поверхности и на глубине 3, 6, 9 м соответственно)

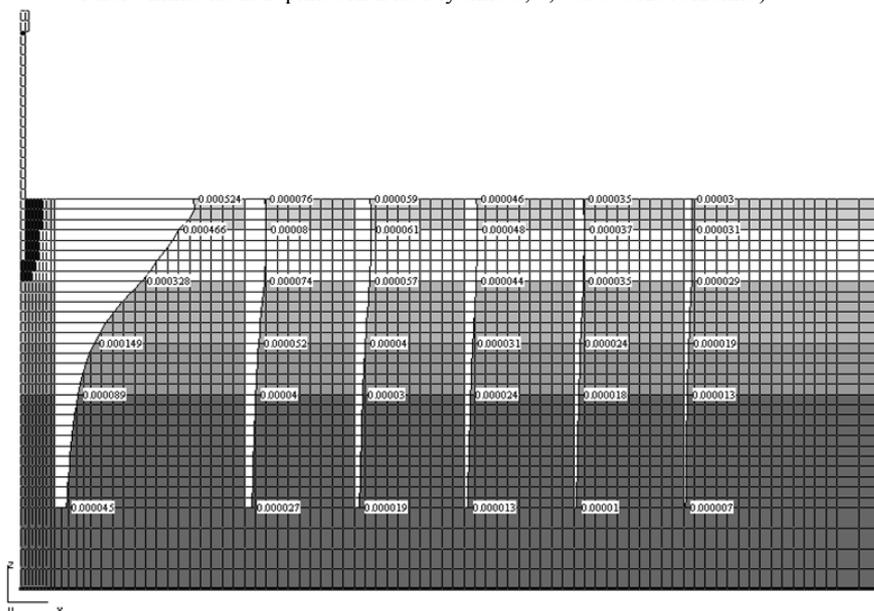


Рис. 9. Эпюры максимальных вертикальных амплитуд смещений (м) грунтовой среды по глубине при забивке сваи на глубину 3м от поверхности (эпюры приведены на расстоянии 1,5, 10, 15, 20, 25, 30 м от источника)

$$F=0,35^2 = 0,1225 \text{ м}^2.$$

Длина свай $l=11 \text{ м}$.

Плотность материала свай $\rho=2,5 \text{ т/м}^3$.

Мгновенный модуль упругости материала свай $E=300000000 \text{ кПа}$.

Масса молота $M=3,8 \text{ т}$.

Высота падения молота $h=1 \text{ м}$.

Скорость молота в момент удара

$$v_0=\sqrt{2g \cdot h}, v_0=4,427 \text{ м/с}.$$

Скорость распространения ударной волны в свае $c=(E/\rho)^{1/2}$, $c=3,464 \times 10^3 \text{ м/с}$.

Динамический модуль амортизатора $E_a=400000 \text{ кПа}$, $n=E/E_a$, $n=75$.

Масса наголовника $m_n=0,2 \text{ т}$.

Толщина амортизатора $\beta=0,15 \text{ м}$.

Эффективная скорость удара $v_e=$

$$(M \cdot V_0)/(M+m_n), v_e=4,206 \text{ м/с}.$$

$$\phi=4 \cdot \rho \cdot \frac{F}{M} \cdot n \cdot \beta, \phi=3,627.$$

$$B=(\phi-1)^{1/2}, B=1,621.$$

$$nu=V_e/c, \text{atan}(B)=58,325 \text{ deg}.$$

Максимальные напряжения в голове свай

$$\sigma=\frac{2 \cdot nu \cdot E}{B} \cdot \sin(\text{atan}(B)) \cdot e^{\left(\frac{-\text{atan}(B)}{B}\right)}$$

$$\sigma=2,041 \times 10^4 \text{ кПа}.$$

Максимальные усилия в голове свай

$$N=\sigma \cdot F, N=2,5 \times 10^3 \text{ кН}.$$

На рис. 6 приведен график напряжений на разных участках свай во времени. Уровень динамических напряжений в свае в соответствии с численным расчетом составил $\approx 21000 \text{ кПа}$, что незначительно отличается от величин напряжений, полученных по рассмотренной выше методике. Максимальные расчетные динамические напряжения в теле свай остаются примерно одинаковыми до уровня нижней трети длины свай, далее их величина постепенно убывает. Такое распределение максимальных динамических напряжений наблюдалось в многочисленных модельных и натурных исследованиях. Описанная картина наблюдается вплоть до конца погружения свай, расчетный максимальный уровень динамических напряжений практически не изменяется с глубиной погружения свай.

Необходимая точность прогнозирования параметров колебаний грунтовой среды может быть достигнута при соответствии расчетных

отказов на каждом этапе расчета реальным отказам при погружении свай. Таким образом, в процессе расчета необходимо производить дополнительную проверку количества ударов молота на каждый метр погружения свай. Другими словами, для проверки решений бывает полезно построить приближенную ходограмму погружения свай для конкретных грунтовых условий, выбранного погружающего оборудования и геометрических размеров свай.

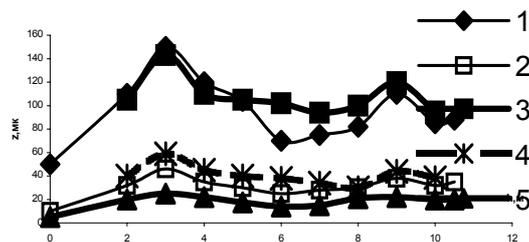


Рис. 10. Зависимости максимальных вертикальных амплитуд смещений (мк) на поверхности грунта от глубины погружения свай на разных расстояниях от источника: 1 – натурные измерения на грунте на расстоянии 5 м от источника; 2 – то же, на расстоянии 15 м; 3 – расчетные данные на расстоянии 5 м; 4 – то же, на расстоянии 15 м; 5 – натурные измерения в здании на расстоянии 12 м от источника

Прогнозирование процесса погружения свай осуществлялось и на основе приближенной методики, базирующейся на энергетическом принципе: полезная работа молота при погружении свай на проектную глубину равна работе сил сопротивления грунта внедрению свай. При этом предполагалось, что законы взаимодействия свай с грунтом при ударном погружении описываются аналогичной упругопластической моделью (рис. 11). Приближенно общее количество ударов по свае в этом случае при пробивке разнородных слоев грунта можно вычислить, исходя из энергетического баланса [10]:

$$N = \sum_i n_i = \frac{P_i l_i}{k E_i - 0,5 P_i c_i}, \quad (8)$$

где n_i – количество ударов молота для пробивки i -го слоя грунта; P_i – динамическое сопротивление грунта в i -м слое; c_i – упругая часть отказа; k – поправочный коэффициент; l_i – толщина i -го слоя грунта; E_i – часть энергии

удара, непосредственно расходуемая на погружение сваи.

Динамическое сопротивление грунта погружению сваи складывается из лобового и бокового сопротивлений по всей длине погруженной части:

$$P_i = R_i F + u \sum f_i l_i, \quad (9)$$

где R_i – лобовое сопротивление; F – площадь поперечного сечения сваи; u – периметр сечения сваи; f_i – динамическое сопротивление сваи по боковой поверхности.

Для приближенных расчетов динамическое сопротивление грунтов погружению сваи может быть взято непосредственно из данных статического зондирования, поскольку они учитывают повышение сопротивления (динамичность процесса), так как внедрение зонда в грунтовую среду осуществляется с постоянной скоростью.

Величина энергии, идущая непосредственно на погружение сваи, в случае молота свободного падения может быть определена из выражения

$$E = 0,9QH\eta, \quad (10)$$

где η – коэффициент передачи энергии молота свае при ударе.

Коэффициент эффективности удара молота в случае незначительного сопротивления грунта погружению сваи может быть приближенно вычислен из условий соударения двух свободных тел в рамках классической теории удара (см. рис. 4):

$$\eta = \frac{1 + me^2}{1 + m}, \quad (11)$$

где m – отношение массы сваи к массе молота; e – коэффициент восстановления удара.

Коэффициент e приближенно может быть назначен соответствующим коэффициенту восстановления выбранным материалом свайного амортизатора.

Поправочный коэффициент k в формуле (8) отражает изменение эффективности удара в зависимости от отношения массы молота к массе сваи (см. рис. 12) [10]:

$$k = \sqrt{Q/q}. \quad (12)$$

Изменение количества ударов на каждый метр погружения иллюстрирует рис. 4, где представлены результаты расчетов по определению среднего количества ударов на основе решения серии численных задач, опытных данных при пробном погружении сваи и решения о прогнозировании количества ударов на основе приближенной методики по данным статического зондирования [10] (СРТ).

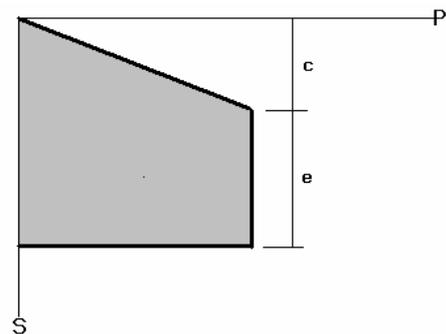


Рис. 11. Диаграмма «отказ–сопротивление» для упругопластической модели грунта

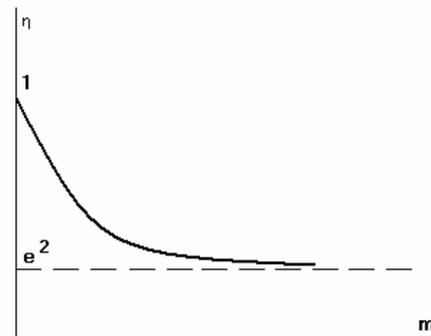


Рис. 12. Зависимость эффективности удара от отношения массы сваи к массе молота

Построение ходограммы погружения сваи позволяет определить общее количество ударов, затрачиваемых на погружение данной сваи выбранным оборудованием, что дает возможность произвести проверку ударной стойкости сваи, которая определяется напряжениями в теле сваи и пределом прочности ее материала. Максимальное напряжение в теле сваи в пределах одного цикла нагружения с учетом предела выносливости ее материала можно представить в виде зависимости [10]

$$\frac{\sigma_{N_{np}}}{R_{cm}} = k_{dy} - k_d \ln N_{np}, \quad (13)$$

где $\sigma_{N_{np}}$ – максимальное напряжение в пределах одного цикла нагружения; k_{dy} – коэффициент динамического упрочнения материала сваи; k_d – коэффициент долговечности, характеризующий сопротивляемость материала сваи многократному приложению нагрузки; N_{np} – предельное количество циклов нагружения, при которых начинается разрушение материала сваи.

Исходя из результатов расчета (определения напряжений в теле сваи с учетом принятого погружающего оборудования и материала сваи) вычислялось допустимое количество ударов для обеспечения условий бездефектного погружения сваи:

Вес молота $Q=3,8$ т.

Высота падения $h=1$ м.

Расчетная энергия удара $E_p=0,9 \cdot Q \cdot h$,

$E_p=3,42$ тм.

Вес сваи $q:=3,4$ т.

Модуль упругости бетона $E=3000000$ т/м².

Кубиковая прочность бетона марки 300
 $R=0,78 \cdot 3000$, $R=2,34 \times 10^3$ т/м².

Величина динамического напряжения в голове сваи при ударе $\sigma=2200$ т/м².

Коэффициент долговечности материала сваи $k_d=0,8$.

Коэффициент динамического упрочнения $k_{dd}=3,3$.

$$\frac{1}{k_d} \cdot \left(k_{dd} - \frac{\sigma \cdot k}{R} \right) = 2.832$$

Допустимое количество ударов

$$10^{\frac{1}{k_d} \cdot \left(k_{dd} - \frac{\sigma \cdot k}{R} \right)} = 679.618$$

Общее количество ударов для обеспечения погружения сваи на проектную глубину 10,5 м, по данным численного расчета, составило 175 ударов; по данным приближенного расчета – 185 ударов. Среднее количество ударов по свае, по данным натурных наблюдений, составило 180 ударов. Таким образом, общее количество ударов не превысило допустимого при данных уровне напряжений и материале сваи, что обеспечило необходимое условие ее бездефектного погружения на проектную глубину.

Проведенный комплекс расчетов позволяет определить не только максимальный уровень смещений, скоростей или ускорений грунтовой среды, но и их суммарную величину, а следовательно – оценить суммарный уровень энергии колебаний, переносимых в исследуемую зону. Суммарный уровень исследуемых компонент смещений в определенной точке грунтовой среды можно легко найти путем перемножения соответствующих эпюр зависимости максимальных компонент колебаний (например, амплитуд смещений – см. рис. 10) от глубины погружения сваи и изменения количества ударов по свае с глубиной погружения (см. рис. 4).

Выполненный анализ процесса ударного погружения сваи позволяет не только прогнозировать уровень интенсивности волновых полей смещений в грунтовой среде и возможность забивки свай около охраняемых объектов, но и проверять условия бездефектного погружения свай.

4. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПАРАМЕТРЫ КОЛЕБАНИЙ

Поскольку численный анализ процесса ударного погружения свай для конкретной площадки и принятой технологии погружения показал неплохую согласованность с данными натурных наблюдений, рассмотрим на примере той же практической задачи влияние основных факторов на параметры колебаний грунтовой среды и уровень динамических напряжений в погружаемом элементе. Среди этих факторов можно выделить: влияние массы и высоты падения молота, жесткости свайного амортизатора, длины и поперечного сечения погружаемой сваи, глубины погружения сваи, грунтовых условий площадки строительства.

4.1. Влияние массы молота и его скорости в момент удара

Рассматривается этап погружения сваи на глубину 6 м. Свая длиной 10 м, поперечным сечением 35х35 см погружается молотом свободного падения. В качестве амортизационного материала выберем прокладку из сосны толщиной 15 см с мгновенным многоцикловым модулем упругости 400 МПа. Анализ влияния массы погружающих молотов

на параметры колебаний грунтовой среды целесообразно производить при постоянной энергии удара. Это условие без учета постоянной величины ускорения свободного падения примет вид

$$M_1 h_1 = M_2 h_2 = \dots = M_i h_i; (M_1 \neq M_2, \dots, h_1 \neq h_2, \dots).$$

Масса погружаемого элемента составит: $m_{св} = 3,1$ т.

Анализировались параметры колебаний на поверхности грунтовой среды, отказы сваи за удар и напряжения в элементе, возникающие в процессе ударного погружения. Были рассмотрены случаи погружения сваи молотами с соотношением массы молота и массы сваи в диапазоне от 0,5 до 1,75 (с увеличением этого соотношения эквивалентно снижалась высота падения молота). Результаты расчетов серии задач сведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что с увеличением соотношения массы молота к массе сваи эффективность удара молота увеличивается (увеличивается отказ сваи за удар). Энергетические затраты на погружение легких молотов (по сравнению с тяжелыми) при одинаковой энергии удара и прочих равных условиях оказываются большими. Данный факт хорошо известен из многочисленных экспериментальных и натуральных данных [5, 6, 10].

Погружение свай легкими молотами является более энергоемким процессом, поскольку в этом случае увеличивается общая доля потерь, снижается эффективность ударного взаимодействия (уменьшается время

соударения, увеличивается коэффициент восстановления), увеличиваются силы вязкого сопротивления грунта внедрению погружаемого элемента.

Наряду с увеличением отказа сваи за удар при эквивалентном увеличении массы молота увеличиваются и величины смещений грунтовой среды (рис. 13), поскольку возрастает доля энергии, расходуемой на погружение сваи. Преобладающая частота колебаний поверхности грунтовой среды в анализируемых точках при различных соотношениях массы молота и массы погружаемого элемента практически не изменялась и составляла 7,38...7,5 Гц. Таким образом, влияния *отношения массы молота к массе сваи* в рассматриваемом диапазоне на *частотный состав* распространяющихся колебаний не прослеживается.

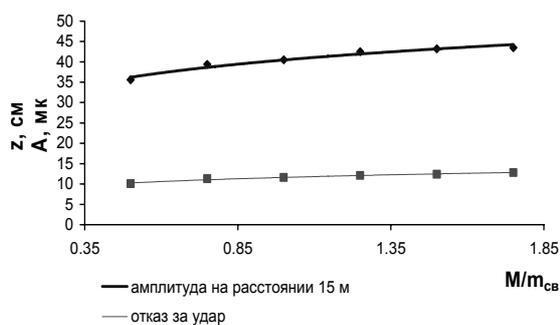


Рис. 13. Изменение амплитуд вертикальных смещений на поверхности грунтовой среды и отказа сваи от величины соотношения массы молота и массы сваи при постоянной величине энергии удара

Таблица 2

Параметры	Номера задач					
	1	2	3	4	5	6
Наименование / №						
Масса молота М, т	1,55	2,33	3,1	3,8	4,65	5,43
Высота падения h, м	2,45	1,64	1,23	1	0,82	0,7
Соотношение M/m _{св}	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75
Скорость молота в момент удара, м/с	6,92	5,67	4,9	4,43	4	3,7
Напряжения в голове сваи, кПа	27050	25290	24800	24210	23115	22000
Напряжения в острие сваи, кПа	8980	8050	7450	6930	6400	6010
Растягивающие напряжения в середине сваи, кПа	19750	10030	6760	2960	1450	1000
Амплитуды вертикальных смещений грунта (r = 15 м), мк	35,6	39,6	40,5	42,1	43,2	43,5
Отказ сваи, см	10,1	11,3	11,6	12,19	12,4	12,7

С увеличением отношения массы молота к массе сваи (при одновременном снижении скорости молота в момент удара) увеличивается время ударного взаимодействия и, соответственно, снижается уровень динамических сжимающих напряжений в голове сваи. Также в этом случае значительно снижается уровень растягивающих напряжений в середине сваи (рис. 14).

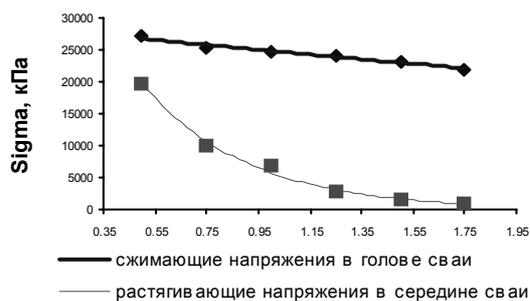


Рис. 14. Изменение напряжений в теле сваи от величины отношения массы молота к массе сваи при постоянной величине энергии удара

4.2. Влияние материала амортизатора

Рассматривается аналогичная задача (см. п. 4.1) – свая, погружаемая молотом свободного падения массой 3,8 т ($M/m_{св} = 1,25$), при этом варьируется динамический модуль упругости свайного амортизатора в диапазоне от 200 (техническая резина) до 600 МПа (асбест, набивка). Результаты расчета сведены в табл. 3.

При увеличении жесткости свайного амортизатора отказы сваи за удар изменялись незначительно. Влияния жесткости свайного амортизатора на амплитуды смещений грунтовой среды и частотный состав распространяющихся колебаний в выполненном численном исследовании не прослеживается.

С увеличением жесткости свайного амортизатора время ударного взаимодействия в рассматриваемой системе уменьшалось, в этом случае возрастали уровень сжимающих напряжений в голове сваи и уровень растягивающих напряжений в середине сваи (рис. 15).

4.3. Влияние длины сваи

Анализ влияния длины сваи на параметры колебаний грунтовой среды и величину динамических напряжений в сваях будем изучать на численном примере ударного погружения

свай на глубину 9 м (на этапе установки 2-й секции сваи). В задачах рассматривается погружение свай поперечным сечением 35 x 35 см длиной 10, 15 и 20 м. Некоторые результаты расчетов сведены в табл. 4.

Таблица 3

Параметры	Номера задач		
Наименование / №	1	2	3
Динамический модуль упругости амортизатора, МПа	200	400	600
Напряжения в голове сваи, кПа	17710	24210	25500
Растягивающие напряжения в середине сваи, кПа	1410	2960	8960
Амплитуды вертикальных смещений грунта ($r = 15$ м), мк	42,0	42,1	42,3
Отказ сваи, см	12.17	12.19	12.21

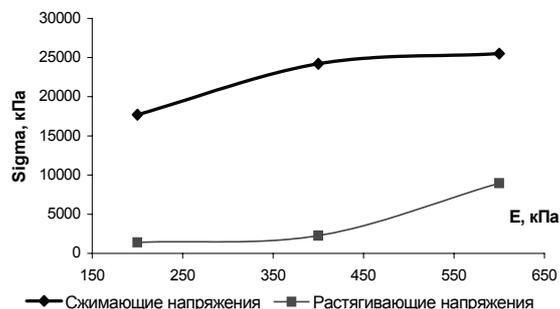


Рис. 15. Изменение напряжений в теле сваи от величины динамического модуля упругого амортизатора

С увеличением длины сваи при постоянных энергии удара и соотношении массы молота и сваи, равном 1 (случаи 1–3), отказы сваи за удар возрастали, поскольку увеличивались время и эффективность ударного взаимодействия. В случаях 1–3, ввиду того, что ударные скорости молотов уменьшались, а их массы увеличивались, наибольшие растягивающие напряжения в середине и сжимающие напряжения в голове сваи также уменьшались.

Рассмотрим погружение свай различной длины одинаковым молотом с неизменными параметрами забивки (случаи 3–5). В этих

Параметры	Номера задач				
	1	2	3	4	5
Наименование / №					
Длина сваи, м	10	15	20	15	10
Масса сваи, т	3,1	4,6	6,2	4,6	3,1
Масса молота, т	3,1	4,6	6,2	6,2	6,2
Высота падения, м	1	0,66	0,5	0,5	0,5
Скорость молота в момент удара, м/с	4,43	3,62	3,13	3,13	3,13
Напряжения в голове сваи, кПа	24310	20300	18310	18600	18800
Растягивающие напряжения в середине сваи, кПа	6123	4450	3400	1350	1100
Амплитуды вертикальных смещений грунта ($r = 15$ м), мк	43,4	44,2	45,3	45,4	44,9
Отказ сваи, см	5,5	6,3	7,1	6,8	6,5

случаях при увеличении длины сваи растягивающие напряжения в середине сваи возрастали.

Во всех рассмотренных случаях (при погружении свай молотами с одинаковой энергией удара) амплитуды смещений в контрольных точках на поверхности грунтовой среды различались незначительно. При этом частотный состав распространяющихся смещений также не претерпел значительных изменений.

4.4. Влияние поперечного сечения погружаемой сваи

Рассмотрим этап погружения свай длиной 10 м с поперечными сечениями (30 x 30)... (40 x 40) см на глубину 9 м. Для обеспечения бездефектности погружения забивку свай целесообразно вести молотом с соотношением массы ударной части и массы погружаемого элемента, равным 1 или более (см. п. 4.1). Некоторые результаты, выполненных расчетов, сведены в табл. 5.

В табл. 5 приведены результаты решения задач для случая погружения свай различного поперечного сечения разными молотами с одинаковой скоростью удара. В этих случаях с увеличением массы погружающего оборудования отказы свай за удар возрастали, при этом увеличивались амплитуды смещений поверхности грунтовой среды (рис. 16) и незначительно возрос уровень растягивающих напряжений в середине сваи. При погружении свай с различными поперечными сечениями молотами одинаковой массы с одинаковой

энергией удара и прочих равных условиях отказы свай за удар увеличивался при уменьшении поперечного сечения погружаемого элемента, при этом увеличивался и уровень смещений на поверхности грунтовой среды. Что же касается частотного состава смещений, распространяющихся по поверхности грунтовой среды, то он в рассматриваемых случаях изменяется незначительно.

Таблица 5

Поперечное сечение сваи, см x см	30x30	35x35	40x40
Масса сваи длиной 10 м, т	2,25	3,1	4
Масса молота, т	2,25	3,1	4
Высота падения, м	1	1	1
Скорость молота в момент удара, м/с	4,43	4,43	4,43
Напряжения в голове сваи, кПа	24200	24200	24200
Растягивающие напряжения в середине сваи, кПа	4420	6125	6735
Амплитуды вертикальных смещений грунта ($r = 15$ м), мк	36,5	43,4	53,2
Отказ сваи, см	5,0	5,5	6,3

4.5. Влияние грунтовых условий

Из выполненного сравнения видно, что на частотный состав колебаний преобладающее влияние оказывают грунтовые условия. Влияние остальных факторов незначительно. При этом с увеличением плотности песчаных грунтов и уменьшением индекса текучести глинистых грунтов возрастают преобладаю-

щие частоты распространяющихся колебаний и уменьшается коэффициент затухания с расстоянием от источника. Что же касается амплитуд колебаний, распространяющихся по поверхности грунтовой среды, то они прежде всего зависят от грунтовых условий площадки, отказов сваи на различных этапах погружения, продолжительности осаживания сваи и ряда других факторов.

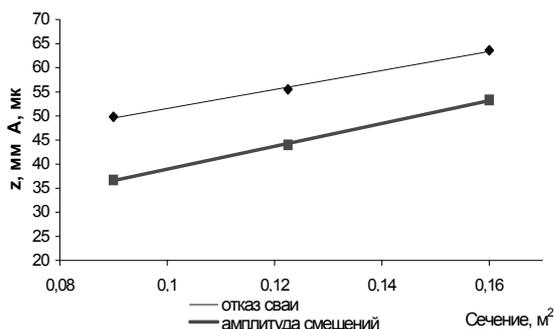


Рис. 16. Изменение амплитуд смещений на поверхности грунтовой среды и отказа сваи от величины поперечного сечения погружаемой сваи

Основной мерой, приводящей к общему снижению уровня колебаний грунтовой среды на площадке, является выполнение предварительного рыхления или лидирования грунта в месте погружения сваи. В частности, в рассмотренной задаче выполнение предварительного рыхления или лидирования грунта на глубину около 4 м (см. рис. 10) позволит снизить уровень амплитуд смещений поверхности грунтовой среды на 20...25 %. В этой связи необходимо отметить, что в случае погружения свай в лидерные скважины или в других случаях малых лобовых сопротивлений грунта погружению (при значительных отказах сваи за удар) возможно развитие существенных растягивающих напряжений в средней трети сваи. При этом величины растягивающих напряжений возрастают с увеличением длины погружаемых элементов.

Таким образом, все рассмотренные факторы, влияющие на параметры колебаний грунтовой среды, можно условно разделить на технологические (связанные с техническими условиями погружения и геометрией элементов) и факторы, связанные с грунтовыми условиями. На уровень напряжений в сваях в большей степени оказывают влияние техно-

логические факторы и в меньшей степени — грунтовые условия. От сопротивления грунта под острием сваи зависит соотношение напряжений в голове и острие погружаемой сваи. На параметры же колебаний грунтовой среды в большей степени влияют грунтовые условия.

Разработанная методика расчетной оценки параметров колебаний грунта при забивке свай позволяет с достаточной точностью прогнозировать величины колебаний на поверхности грунта и в глубине массива, подбирать щадящие технологические режимы производства работ.

Среди выявленного комплекса основных факторов, которые необходимо учитывать при моделировании процессов распространения волн в грунтовой среде, сопровождающих погружение свай, основное значение имеют:

взаимодействие всех элементов системы «молот–амортизатор–свая–грунт» (для случая ударного погружения) и «вибропогружатель–свая–грунт» (для случая вибрационного погружения);

неоднородность волновых свойств грунтовой среды;

изменение физико-механических свойств околосвайного массива грунта в процессе погружения сваи (расструктурирование), не только влияющее на характер распространения волн в среде, но и приводящее к изменению условий работы сваи как источника колебаний в процессе погружения;

вид и характер силового воздействия в источнике (решение контактной задачи при моделировании ударного взаимодействия в системе «молот–амортизатор–свая–грунт»).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика расчетной оценки параметров колебания грунта позволяет еще на этапе вариантного проектирования провести численный эксперимент по погружению сваи в массив грунта и на его основе предложить меры по обеспечению щадящих технологических режимов: рыхление или лидирование слоев грунта, определяющих максимальные расчетные уровни колебаний, подбор массы молота, высоты падения, частоты вибропогружателя.

Результаты моделирования позволяют определить зоны, в которых конкретная технология погружения свай может применяться без дополнительных технологических ограничений, потенциально опасные зоны, где требуются мероприятия по снижению уровня колебаний, и зоны, в которых погружение свай забивкой недопустимо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баркан Д. Д. Виброметод в строительстве. М.: Госстройиздат, 1959. 315с.
2. Васенин В. А. Расчетная оценка параметров колебаний грунта при погружении свай: Автореф. дисс...канд. техн. наук. СПб. 2002. 24 с.
3. Васильевский Ю. И., Шумлянский И. Ф. Теоретические и экспериментальные исследования динамики сваи при забивке // Распространение упругих и упругопластических волн (материалы V Всесоюзного симпозиума). Алма-Ата: Наука, 1973. С. 111–116.
4. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высш. школа, 1978. 447 с.
5. Калюжнюк М. М., Рудь В. К. Сваебойные работы при реконструкции: Влияние колебаний на здания и сооружения. Л.: Стройиздат, 1989. 160 с.
6. Ковалев В. Ф. Исследование влияния забивки свай на подземные трубопроводы при устройстве фундаментов в условиях реконструкции предприятий нефтехимии: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Пермь. 1981.
7. Красников Н. Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения. Л.: Стройиздат, 1970.
8. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1974. 194 с.
9. Нагаев Р. Ф. Механические процессы с повторными затухающими соударениями. М.: Наука, 1985. 200 с.
10. Новожилов Г. Ф. Бездефектная технология погружения свай в талых и вечномерзлых грунтах. Л.: Стройиздат, 1987. 112 с.
11. Пановко Я. Г. Введение в теорию механического удара. М.: Наука, 1977. 224 с.
12. Преображенская Н. А. Экспериментальные данные о погружении и извлечении шпунта и свай вибрированием в песчаных грунтах // Динамика грунтов: Сб. НИИОСП. №32. М.: Госстройиздат, 1958. 164 с.
13. Рудь В. К. Методика определения осадок зданий при забивке вблизи них свай и шпунта: Автореф. дисс. канд. техн. наук. М., 1984.
14. Школьников И. Е. Исследование динамических напряжений в свае при забивке: Автореф. дисс...канд. техн. наук. М., 1976.
15. Holeyman A, Vanden Berghe J. F, S. De Cock. Toe resistance during pile vibratory penetration. Proceedings of the 12th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Eng./ Amsterdam/ Netherlands/ June 1999// Geotechnical Eng. for Transportation Infrastructure. 1999. Vol. 2. Rotterdam. P. 769–776.
16. Lysmer J., Kuhlemeyer R. L. Finite dynamic model for infinite media // J. Eng. Mech. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. 1969. 95. № 4.
17. Smith E.D.L Pile – Driving Analysis by the Wave Equation. // J. of the Soil Mech. and Found. Div. Amer. Soc. Civ. Eng. 1960. August.
18. ВСН 490–87. Проектирование и устройство свайных фундаментов и шпунтовых ограждений в условиях реконструкции промышленных предприятий и городской застройки / Минмонтажспецстрой СССР. М., 1987.