



Кубанский государственный
аграрный университет им. И. Т. Трубилина

Лекция 6 по дисциплине: «Основания и фундаменты сооружений» Специальность - 08.05.01 Строительство уникальных зданий

Полищук А. И.
заведующий кафедрой
оснований и фундаментов,
д-р техн. наук, профессор



Методы определения несущей способности свай

Аналитический метод

Сваи-стойки. Несущая способность свай-стоек F_d оценивается по двум условиям: по условию прочности материала ствола сваи и по условию прочности грунта под ее нижним концом. За несущую способность свай-стойки F_d в проекте принимается меньшее значение.

Несущая способность свай-стойки по материалу определяется по формуле:

$$F_{dm} = \gamma_c \cdot \varphi \cdot (\gamma_{cb} \cdot \gamma'_{cb} \cdot R_b \cdot A_b + R_{sc} \cdot A_s), \quad (1.1)$$

где γ_c – коэффициент условий работы сваи ($\gamma_c = 0,9-1,0$);
 φ – коэффициент продольного изгиба (для низкого роста $\varphi = 1$, для высокого φ находится с учетом длины заземления сваи в грунте);
 γ_{cb} – понижающий коэффициент условий работы бетона, учитывающий бетонирование в узком пространстве скважин и обсадных труб: $\gamma_{cb} = 0,85-1$;
 γ'_{cb} – дополнительный понижающий коэффициент, учитывающий влияние способа производства свайных работ и зависящий от способа бетонирования скважин ($\gamma'_{cb} = 0,7-1,0$);
 R_b – расчетное сопротивление бетона сжатию, кПа (СП63.13330.2018);
 A_b – площадь поперечного сечения сваи, м²;
 R_{sc} – расчетное сопротивление арматуры сжатию, кПа (СП63.13330.2018);
 A_s – площадь поперечного сечения арматуры, м².

Несущая способность свай по материалу F_{dm} , работающей на растяжение (на выдергивание) определяется по формуле:

$$F_{dm} = \gamma_c \cdot (\gamma_{cb} \cdot \gamma'_{cb} \cdot R_{bt} \cdot A_b + R_s \cdot A_s), \quad (1.2)$$

где $\gamma_c, \gamma_{cb}, \gamma'_{cb}, A_b, A_s$ – то же, что и в формуле (1.1);
 R_{bt} – расчетное сопротивление бетона растяжению, кПа (СП63.13330.2018);
 R_s – расчетное сопротивление арматуры растяжению, кПа (СП63.13330.2018).

Для свай заводского изготовления рекомендуется выполнять расчеты на усилия, возникающие при их транспортировке, складировании и подъеме на копер за одну точку. При этом усилие в свае от ее собственного веса следует определять с учетом коэффициента динамичности, равного: 1,5 – при расчете по прочности; 1,25 – при расчете по образованию трещин.

Методы определения несущей способности свай

Аналитический метод

Несущая способность сваи-стойки по грунту (по прочности грунта) F_d под ее нижним концом определяется по формуле:

$$F_d = \gamma_c \cdot R \cdot A, \quad (2.1)$$

где γ_c – коэффициент условий работы сваи в грунте, принимаемый равным 1,0;

A – площадь опирания сваи на грунт, м²;

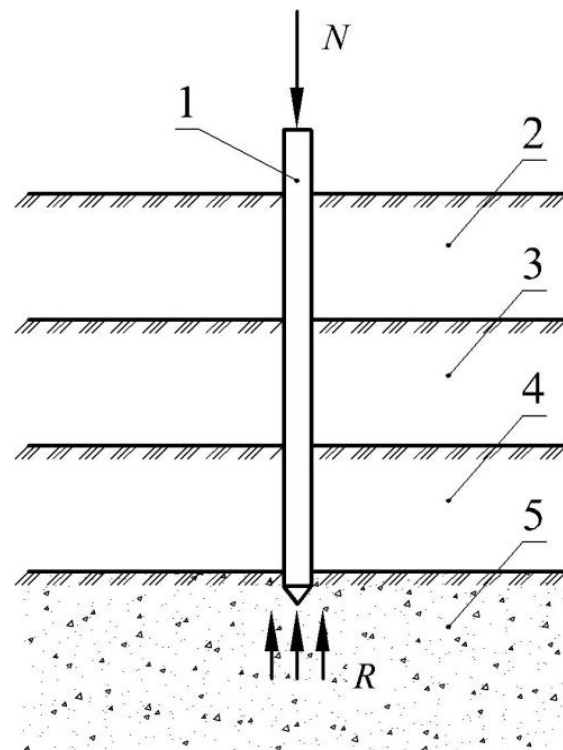
R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа.

Расчетное сопротивление грунта R для всех видов **забивных свай** принимается равным 20000 кПа. Для **набивных, буровых свай и свай-оболочек**, заполняемых бетоном, опирающихся на невыветрелые скальные и малосжимаемые грунты (без слабых прослоек) и заглубленные в них менее чем на 0,5 м, R следует определять по формуле:

$$R = R_m = \frac{R_{c,m,n}}{\gamma_q}, \quad (2.2)$$

где R_m – расчетное сопротивление массива скального грунта под нижним концом сваи-стойки, определяемое по $R_{c,m,n}$ – нормативному значению предела прочности на одноосное сжатие массива скального грунта в водонасыщенном состоянии, кПа;

γ_q – коэффициент надежности по грунту, принимаемый равным 1,4.



Расчетная схема к определению несущей способности F_d сваи-стойки: 1 – железобетонная свая заводского изготовления; 2, 3, 4 – сжимаемые грунты, соприкасающиеся с боковой поверхностью сваи; 5 – малосжимаемый грунт; R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа; N – внешняя нагрузка на сваю, кН

Методы определения несущей способности свай

Аналитический метод

Висячие сваи (сваи трения). Несущая способность F_d висячих свай определяется по формуле:

$$F_d = \gamma_c \cdot (\gamma_{cR} \cdot R \cdot A + u \cdot \sum_{i=1}^n \gamma_{cf} \cdot f_i \cdot h_i), \quad (3.1)$$

где γ_c – коэффициент условий работы сваи в грунте, для забивных свай принимаемый $\gamma_c = 1$;

R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, принимаемое для забивных свай по СП 24.13330.2011;

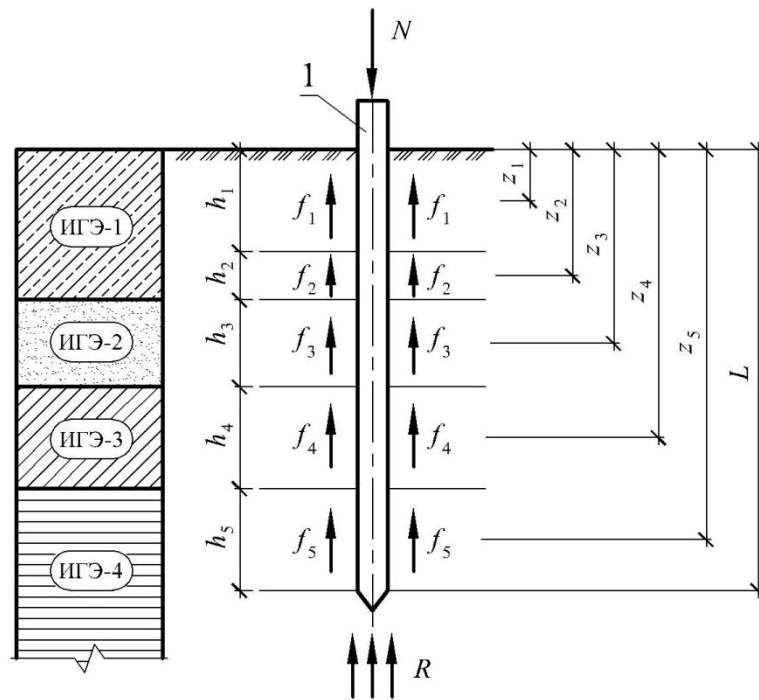
A – площадь поперечного сечения сваи, м²;

f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности сваи, кПа, принимаемое по СП 24.13330.2011;

h_i – толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м, принимаемая $h_i \leq 2$ м;

γ_{cR} , γ_{cf} – соответственно коэффициенты условий работы грунта под нижним концом и по боковой поверхности для забивных и вдавливаемых свай, учитывающие влияние способа их погружения и принимаемые по СП 24.13330.2011.

Метод определения несущей способности F_d по (3.1) распространяется на **висячие забивные, вдавливаемые сваи, а также сваи-оболочки погружаемые без выемки грунта** на вдавливающую (сжимающую) нагрузку.



Расчетная схема к определению несущей способности сваи F_d аналитическим методом

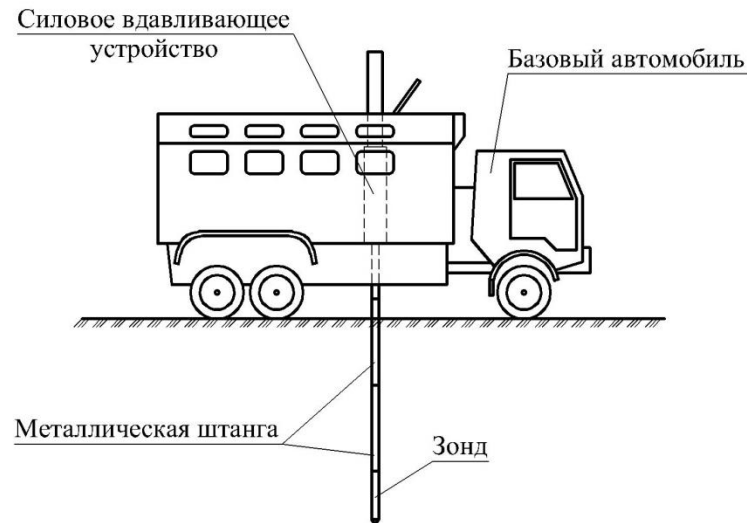
Для забивных и вдавливаемых свай, опирающихся нижним концом на рыхлые пески или глинистые грунты с показателем текучести $I_L > 0,6$, несущую способность F_d следует определять по результатам статического зондирования грунтов.

Методы определения несущей способности свай

Метод статического зондирования грунтов

Метод основан на внедрении в грунт **стандартного зонда**, представляющего собой металлическую штангу с конусом на конце (диаметр основания конуса 36 мм, площадь 10 см², угол заострения 60 град.). Этот метод предусматривает использование зондирующих установок, которые бывают обычно самоходными и устраиваются на базе автомобилей или тракторов.

Рассматриваемый метод применяется для определения несущей способности F_d забивных, винтовых, буровых и других видов свай в песчаных и глинистых грунтах (СП 24.13330.2011). В отечественной практике для зондирования грунтов применяют **зонды двух типов**. Зонд первого типа позволяет измерять сопротивление грунта под наконечником зонда и общее сопротивление его погружению. Сопротивление грунта по боковой поверхности зонда определяется как разность между общим сопротивлением его погружению и сопротивлением под его наконечником. В настоящее время зонды первого типа применяются довольно редко. Зонд второго типа имеет конусный наконечник и муфту трения над ним. При погружении зонда измеряется раздельно сопротивление грунта под его наконечником и по его боковой поверхности.



Установка для статического зондирования грунтов на базе грузового автомобиля

На выбранной строительной площадке проводят испытания грунтов с применением наиболее распространенного зонда (обычно второго типа) и измеряют сопротивление внедрению зонда под острием q_s и по его боковой поверхности f_s . Затем, используя переходные коэффициенты (β_1 , β_2), устанавливают параметры предельного сопротивления грунта под острием R_s и по боковой поверхности f для натурной свай.

Методы определения несущей способности свай

Метод статического зондирования грунтов

Для забивных железобетонных свай характеристика F_u определяется:

$$F_u = R_s \cdot A + f \cdot h \cdot u, \quad (5.1)$$

$$R_s = \beta_1 \cdot q_s, \quad (5.2)$$

где R_s – предельное сопротивление грунта под нижним концом сваи по данным статического зондирования в рассматриваемой точке, кПа;

β_1 – коэффициент перехода от сопротивления грунта под зондом q_s к сопротивлению грунта под нижним концом сваи R_s после ее отдыха (СП 24.13330.2011);

q_s – среднее значение сопротивления грунта под нижним концом зонда, кПа.

Для наиболее применяемых (распространенных) зондов второго типа (СП 24.13330.2011) среднее значение предельного сопротивления грунта по боковой поверхности сваи f определяют из выражения:

$$f = \beta_2 \cdot f_s, \quad (5.3)$$

где β_2 – коэффициент перехода от сопротивления грунта по боковой поверхности зонда f_s к сопротивлению грунта по боковой поверхности сваи f после ее отдыха (СП 24.13330.2011);

f_s – среднее значение сопротивления грунта по боковой поверхности зонда, кПа, определяемое экспериментально при его вдавливании.

В зависимости от конструктивных решений зондов (зонды первого, второго и других типов, см. СП 24.13330.2011) используются и другие формулы для определения параметра f .

Несущая способность сваи F_d по результатам статического зондирования грунтов при шести и более испытаниях определяется по формуле:

$$F_d = \frac{\gamma_c \cdot \sum F_{u,n}}{n \cdot \gamma_g}, \quad (5.4)$$

где γ_c – коэффициент условий работы, принимаемый $\gamma_c = 1$ (по СП 24.13330.2011);

$\sum F_{u,n}$ – частные значения предельного сопротивления грунта при погружении сваи, кН, в точках статического зондирования грунтов (ГОСТ 20522–2012);

n – число точек статического зондирования грунтов;

γ_g – коэффициент надежности по грунту, принимаемый $\gamma_g = 1$ при $F_{u,n} = F_{u,min}$, либо по СП 24.13330.2011.

Методы определения несущей способности свай

Метод испытаний грунтов эталонными сваями

Для оценки несущей способности свай F_d , наряду с зондами, используются специальные эталонные сваи. **Эталонная** – это забивная свая, состоящая из инвентарной составной металлической трубы, нижний конец которой закрыт коническим наконечником. Наружный диаметр стандартной эталонной сваи 114 мм (ГОСТ 5686–2012). Эталонные сваи бывают трех типов. Один тип позволяет замерять сопротивление грунта под острием эталонной сваи (**тип I**), а второй – под острием и по боковой поверхности (**тип II**). Эталонные составные сваи обычно бывают длиной до 12 м. Если предусмотрена оценка несущей способности свай F_d длиной более 12 м, то допускается производить испытания грунтов статической нагрузкой с помощью металлической сваи-зонда (**тип III**), конструкция которой обеспечивает также раздельное измерение сопротивления грунта под нижним концом и по боковой поверхности сваи.

Разовое (частное) значение предельного сопротивления забивной натурной свай F_u , работающей на вдавливающую нагрузку, по результатам испытаний грунтов эталонной сваей определяется:

1. При испытании грунтов **эталонной сваей типа I** по формуле:

$$F_u = \gamma_{sp} \cdot \frac{u}{u_{sp}} \cdot F_{u,sp}, \quad (6.1)$$

где γ_{sp} – коэффициент, принимаемый равным 1,25 при заглублении сваи в плотные пески независимо от их крупности или крупнообломочные грунты и равным 1,0 для остальных грунтов;

u , u_{sp} – соответственно параметры поперечного сечения натурной сваи и эталонной сваи;

$F_{u,sp}$ – частное значение предельного сопротивления эталонной сваи, кН, определяемое по результатам испытаний ее статической нагрузкой.

2. При испытании грунтов **эталонной сваей типа II** или сваей-зонтом (тип III) по формуле:

$$F_u = \gamma_{CR} \cdot R_{sp} \cdot A + \gamma_{cf} \cdot f_{sp} \cdot u \cdot h, \quad (6.2)$$

где γ_{CR} – коэффициент условий работы под нижним концом забивной натурной сваи, принимаемый в зависимости от параметра R_{sp} ;

R_{sp} – предельное сопротивление грунта под нижним концом эталонной сваи, кПа;

A – площадь поперечного сечения натурной сваи, м²;

γ_{cf} – коэффициент условий работы по боковой поверхности натурной сваи, принимаемый по таблице 4.9 в зависимости от параметра f_{sp} ;

f_{sp} – среднее значение предельного сопротивления грунта по боковой поверхности эталонной сваи, кПа;

h – глубина погружения натурной сваи, м;

u – периметр поперечного сечения ствола натурной сваи, м.

В случае применения эталонной сваи типа II следует проверить соответствие суммы предельных сопротивлений грунта под нижним концом и по боковой поверхности эталонной сваи ее предельному сопротивлению. Если разница между ними превышает 20 %, то расчет предельного сопротивления натурной сваи должен выполняться как для эталонной сваи типа I (формула (6.1)).

Методы определения несущей способности свай

Метод испытаний грунтов эталонными сваями

Несущая способность F_d забивной висячей натурной сваи, работающей на вдавливающую нагрузку, по результатам испытаний грунтов эталонной сваей определяется по формуле (7.1), используемой при статическом зондировании грунтов. В этом случае при количестве испытаний n эталонных свай менее шести ($n < 6$) частное значение предельного сопротивления грунта $F_{u,n}$ при погружении эталонной сваи следует принимать равным наименьшему предельному сопротивлению $F_{u,min}$, полученному из результатов испытаний, т. е. $F_{u,n} = F_{u,min}$. Коэффициенты γ_c и γ_g при этом следует в (7.1) принимать равными 1,0.

$$F_d = \frac{\gamma_c \cdot \sum F_{u,n}}{n \cdot \gamma_g}, \quad (7.1)$$

где γ_c – коэффициент условий работы, принимаемый $\gamma_c = 1$ (по СП 24.13330.2011);

$\sum F_{u,n}$ – частные значения предельного сопротивления грунта при погружении сваи, кН;

n – количество испытаний эталонных свай;

γ_g – коэффициент надежности по грунту, принимаемый $\gamma_g = 1$ при $F_{u,n} = F_{u,min}$.

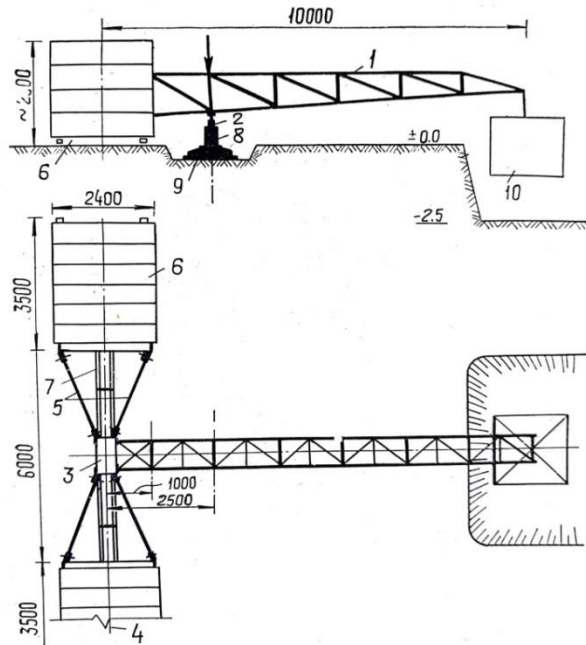
Значения коэффициентов условий работы γ_{cR} и γ_{cf} для определения параметра предельного сопротивления натурной сваи

R_{sp} , кПа	Коэффициент γ_{cR} в зависимости от R_{sp}		f_{sp} , кПа	Коэффициент γ_{cf} в зависимости от f_{sp} для эталонных свай типов II и III		Коэффициент γ_{cf} в зависимости от f_{sp} для сваи-зонда
	для эталонных свай типа II	для эталонных свай типа III		при песках	при глинистых грунтах	
≤ 2000	1,15	1,40	≤ 20	2,00	1,20	0,90
3000	1,05	1,20	30	1,65	0,95	0,85
4000	1,00	0,90	40	1,40	0,80	0,80
5000	0,90	0,80	50	1,20	0,70	0,75
6000	0,80	0,75	60	1,05	0,65	0,70
7000	0,75	0,70	80	0,80	0,55	–
10000	0,65	0,60	≥ 120	0,50	0,40	–
≥ 13000	0,60	0,55	–	–	–	–

Примечание. 1. Для промежуточных значений R_{sp} и f_{sp} значения γ_{cR} и γ_{cf} определяют интерполяцией. 2. В случае, если по боковой поверхности сваи залегают пески и глинистые грунты, коэффициент γ_{cf} определяют по формуле (см. СП 24.13330.2011).

Методы определения несущей способности свай

Статический метод определения несущей способности свай



Установка МИСИ (ныне НИУ МГСУ) для проведения статических испытаний натуральных свай и моделей фундаментов



Общий вид установки МИСИ (ныне НИУ МГСУ) с конструкцией рычага в виде составной металлической стрелы и пространственной металлической фермы для проведения статических испытаний натуральных свай и моделей фундаментов

Для проведения натуральных испытаний свай используются различные конструкции установок и загрузочных систем. Например, установки с упорной балкой (балками) и анкерными сваями, платформы с тарированными грузами, рычажные системы и другие. Заслуживает внимания загрузочная рычажная установка для статических испытаний натуральных свай и моделей фундаментов (штампов), которая была разработана в МИСИ (ныне НИУ МГСУ) В. Ф. Сидорчуком, А. И. Полищуком и А. В. Знаменским (1980 г.). При этом максимальная нагрузка на сваю (штамп) доводилась до 700 кН. Конструкция рычага установки выполнялась в двух вариантах: в виде пространственной фермы и составной плоской стрелы. Изготовление составной стрелы было продиктовано удобством транспортировки и монтажа установки. Основное преимущество загрузочной рычажной установки заключалось в том, что усилие на испытываемую конструкцию (сваю, штамп) могло передаваться с различной скоростью и контролем во времени. Загрузочная рычажная установка позволяла проводить испытания до осадки сваи 40 мм и более без промежуточной разгрузки.

Методы определения несущей способности свай

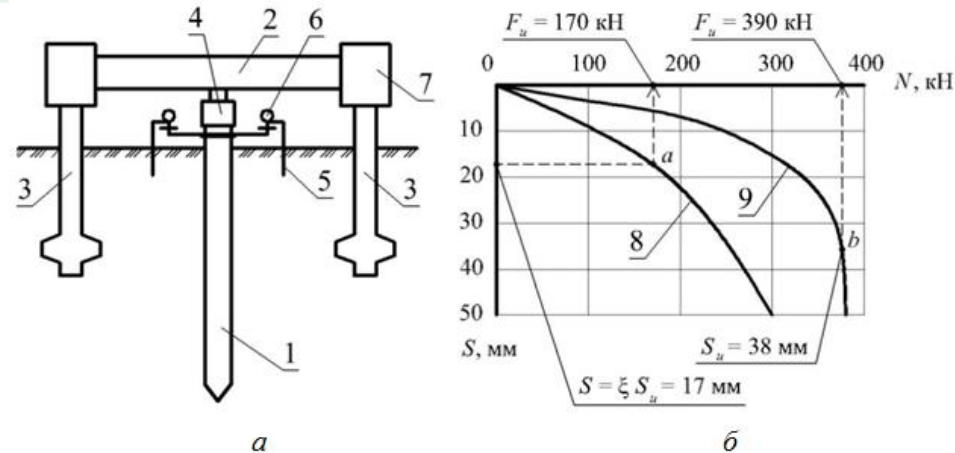
Статический метод

Наибольшее распространение в настоящее время получили установки с упорной балкой и анкерными сваями. Нагрузка на голову сваи передается ступенями, величина которых составляет 0,1–0,15 от предполагаемой несущей способности F_d . Каждая ступень нагрузки выдерживается до условной стабилизации осадок, принимаемой обычно 0,1 мм за 1 час наблюдений, если под их нижними концами залегают песчаные или глинистые грунты от твердой до тугопластичной консистенции, а также за 2 часа наблюдений, если под их нижними концами залегают глинистые грунты от мягкопластичной до текучей консистенции. Испытания, обычно, доводят до осадки сваи S , равной $S = 40$ мм. Для свай большого диаметра (50 см и более) и значительной несущей способности (более 1000 кН) испытания обычно ведут до осадки 20 мм, а иногда и меньше.

По результатам испытаний свай строятся графические зависимости $S = f(N)$ «осадка–нагрузка». При этом чаще зависимости бывают двух видов:

- с плавным нарастанием осадки сваи S на всем рассматриваемом участке нагружения (8);
- с плавным, а затем резким нарастанием осадки сваи S на рассматриваемом участке ее нагружения (9).

Несущая способность сваи F_d по грунту для графика (9) определяется по точке b , при которой осадка сваи S начинает значительно возрастать. На этапе проектирования фундаментов за предельную нагрузку F_u принимают ту, при которой наступает непрерывная осадка без увеличения внешней нагрузки (происходит



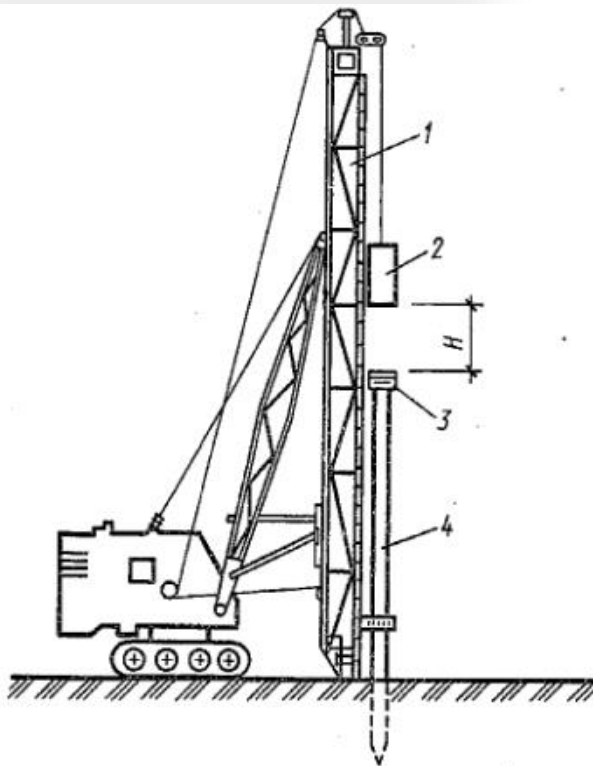
Статические испытания натуральных свай вдавливающей нагрузкой (срыв сваи). В случае рассмотрения зависимости (8) характерно ее плавное очертание и резких переломов на графике $S = f(N)$ не наблюдается. Предельной в этом случае считается такая нагрузка F_u (рис. 4.25, б) при действии которой испытываемая свая получает осадку S , равную:

$$S = \xi \cdot S_u, \quad (9.1)$$

где ξ – коэффициент перехода, учитывающий ряд факторов при статических испытаниях свай (см. п. 7.3.5 СП 24.13330.2011 с изменениями, введенными в действие 04.06.2017 г.) и принимаемый равным $\xi = 0,2$;

S_u – предельное значение средней осадки фундамента проектируемого здания, устанавливаемое СП 22.13330.2016

Методы определения несущей способности свай



Динамический метод

Для устройства готовых свай различных видов используются специальные самоходные копровые установки (агрегаты) с навесными мачтами на которых устанавливаются погружатели (дизель-молоты штанговые, дизель-молоты трубчатые, гидромолоты, вибромолоты, вибропогружатели и др.). Сваи при этом забиваются, вдавливаются или ввинчиваются, а их несущая способность F_d может определяться динамическим методом по результатам оценки работы погружателя.

При динамическом методе **несущая способность сваи F_d** устанавливается по величине ее отказа на отметке близкой к проектной. **Отказ** забивной сваи – это погружение ее от одного удара в залоге. **Залог** – это серия ударов, выполняемая при забивке свай после ее отдыха. Число ударов в залоге рекомендуется принимать для молотов подвесных одиночного действия 4–5. Для молотов двойного действия не более 10. Если используется вибропогружатель, то за отказ принимается величина погружения сваи за одну минуту его работы. **Отдых** сваи – это время, необходимое для релаксации напряжений в околосвайном грунте после ее погружения.

Впервые в России работа готовых свай при погружении их в грунт молотом была рассмотрена профессором Н. М. Герсеговым (1917 г.). При этом был предложен динамический метод определения несущей способности свай F_d , который основан на рассмотрении их взаимодействия с грунтом при добивке после отдыха. В методе учитывается полная работа, производимая ударом молота о голову сваи GH и работа, расходуемая на погружение сваи; ее упругие деформации и различные потери (нагрев соударяющихся частей при погружении, разрушение головы сваи, превращение механической энергии в тепловую и др.). В общем виде можно записать уравнение:

$$GH = F_u \cdot e + G \cdot h + \alpha \cdot G \cdot H, \quad (10.1)$$

где G – вес ударной части молота, кН; H – высота падения ударной части молота, м;
 F_u – предельное сопротивление сваи в грунт, кПа; e – отказ сваи, м;
 h – высота подскока молота после удара, м; α – коэффициент, характеризующий потери энергии различного рода при погружении свай.

Методы определения несущей способности свай

Статический метод

После преобразования и упрощения уравнения (10.1) была получена формула для определения предельного сопротивления свай F_u по результатам ее разового испытания динамической нагрузкой:

$$F_u = \frac{\eta \cdot A \cdot M}{2} \cdot \sqrt{1 + \frac{4 \cdot E_d}{\eta \cdot A \cdot e} \cdot \frac{m_1 + \varepsilon^2 \cdot (m_2 + m_3)}{m_1 + m_2 + m_3}} - 1, \quad (11.1)$$

где η – коэффициент, зависящий от упругих свойств материала свай, кН/м²: $\eta = 1500$ кН/м² – для железобетонных свай с наголовником; $\eta = 1000$ кН/м² – для деревянных свай без подбабка; $\eta = 800$ кН/м² – то же с подбабком;

A – площадь поперечного сечения свай, м²;

M – коэффициент, учитывающий способ погружения свай, для забивных свай $M = 1$;

E_d – расчетная энергия удара молота, принимаемая по табл. 7.13 и 7.14 СП 24.13330. 2011, кДж;

e – фактический отказ свай, м;

m_1 – масса молота (вибропогружателя и др.), тс;

m_2 – масса свай и наголовника, тс;

m_3 – масса подбабка (при вибропогружении свай

$m_3 = 0$), тс;

ε – коэффициент восстановления удара; при забивке железобетонных свай молотом ударного действия с применением наголовника с деревянным вкладышем $\varepsilon^2 = 0,2$, а при вибропогружателе $\varepsilon^2 = 0$.

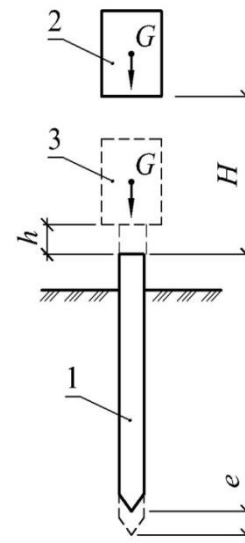


Схема работы свай при ее добивке после отдыха

Полученные разовые результаты F_u по формуле (4.16) всегда отличаются друг от друга и поэтому должны быть обработаны. Результат обработки заключается в получении итогового значения несущей способности свай F_d по грунту, определяемого из выражения:

$$F_d = \frac{\gamma_c \cdot F_u}{\gamma_g}, \quad (11.2)$$

где γ_c , γ_g – соответственно коэффициенты условий работы и надежности, принимаемые по п. 7.33 СП 24.13330.2011;

F_u – тоже, что и в (10.1), (11.1).



БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!

Кубанский государственный
аграрный университет имени И. Т. Трубилина
*заведующий кафедрой «Основания и фундаменты»,
д-р техн. наук, профессор Полищук А. И.*