

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(СИБСТРИН)

**Кафедра инженерной геологии,
оснований и фундаментов**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И РАСЧЕТ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА
(пример расчета)**

Методические указания
для студентов, обучающихся по направлениям подготовки
07.03.01 «Архитектура», 07.03.02 «Реконструкция и реставрация
архитектурного наследия», 07.03.04 «Градостроительство»
и 08.03.01 «Строительство» всех форм обучения

НОВОСИБИРСК 2023

Методические указания разработаны канд. техн. наук, доцентом
С.В. Линовским и ст. преподавателем Т.А. Якушкиной.

Утверждены учебно-методической комиссией
института строительства
11 сентября 2023 года

Рецензенты:

- О.А. Коробова, д-р техн. наук, профессор кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов НГАСУ (Сибстрин);
- В.С. Молчанов, канд. техн. наук, профессор кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов НГАСУ (Сибстрин)

© Новосибирский государственный
архитектурно-строительный
университет (Сибстрин), 2023

Настоящие методические указания посвящены проектированию свайных фундаментов и могут быть использованы студентами, обучающимися по направлениям подготовки 07.03.01 «Архитектура», 07.03.02 «Реконструкция и реставрация архитектурного наследия», 07.03.04 «Градостроительство» и 08.03.01 «Строительство» всех форм и уровней подготовки, при выполнении практических и расчетных упражнений, курсовых проектов и работ, выпускных квалификационных работ и т.п. Также их можно рассматривать в качестве развития рекомендаций, включенных в методическую разработку «Проектирование оснований и фундаментов промышленного здания» (авторы канд. техн. наук, доцент С.В. Линовский, ст. преподаватель Т.А. Якушкина), изданную в НГАСУ (Сибстрин) в 2021 году [1].

Введение

Свайный фундамент – это строительная конструкция, состоящая из стержневых элементов (свай), погруженных в грунт и объединенных между собой в верхней части ростверком. Сваи и ростверки могут быть изготовлены из бетона, железобетона или стали, реже – из дерева.

Несмотря на большое разнообразие конструкций свайных фундаментов, все они предназначены для выполнения единой функции – передачи и распределения нагрузки от здания (сооружения) на грунты, расположенные в глубине массива.

Расчет свайных фундаментов включает в себя решение следующих задач:

- 1 Выбор типа свайных фундаментов и соответствующих конструкций свай и ростверков.
- 2 Определение основных размеров (длина, поперечное сечение) свай, их количества, размещение свай в кусте, определение размеров ростверка.
- 3 Оценка допустимости совместных деформаций основания и свайного фундамента.

4 Проверка условий прочности и деформируемости элементов свайного фундамента (свай и ростверка – при необходимости).

Расчет свайных фундаментов, в соответствии с современными нормами [2], выполняется по двум группам предельных состояний. По первой группе предельных состояний (I ПС) определяется несущая способность свай по грунту, прочность (несущая способность) материала тела (ствола) свай и ростверка, устойчивость свай и фундаментов при действии горизонтальных нагрузок, а также оснований, ограниченных круто падающими откосами. По второй группе предельных состояний (II ПС) рассчитываются деформации (в частности, осадки) оснований свайных фундаментов, горизонтальные перемещения свай и фундаментов (при действии сдвигающих нагрузок), образование и раскрытие трещин в элементах железобетонных конструкций свайных фундаментов.

В настоящих методических указаниях не рассматриваются расчеты конструкций свай и ростверков. Такие расчеты могут быть выполнены по соответствующим сводам правил (СП) в зависимости от применяемых для изготовления свай и ростверков материалов.

1 Общая последовательность проектирования и расчета свайного фундамента

Проектирование, расчет и конструирование свайных фундаментов следует осуществлять с соблюдением геотехнических требований, содержащихся в СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты» [2].

Последовательность проектирования свайного фундамента:

1.1 Анализ инженерно-геологических условий строительной площадки. По имеющимся исходным данным устанавливаются: географический пункт строительства объекта, объем выполненных инженерно-геологических работ (расположение, количество и глубина проходки скважин в пределах пятна застройки), описание грунтов (инженерно-геологических элементов (ИГЭ))

в порядке их залегания сверху вниз, мощность пластов грунта и особенности их залегания, гидрологические условия (наличие/отсутствие грунтовых вод, отметка их расположения и амплитуда сезонного колебания). При необходимости – на основании полученных сведений – строится геологический разрез строительной площадки.

С помощью физико-механических характеристик ИГЭ выполняется вычисление недостающих значений классификационных показателей, в соответствии с [3] (или иной справочно-нормативной литературой) выделяются разновидности для каждого из грунтовых напластований. В частности, для связных (глинистых) грунтов определяется их вид и наименование по числу пластичности (I_p) и показателю текучести (I_L), выполняется предварительная оценка просадочности и набухаемости при замачивании. Для несвязных (песчаных и крупнообломочных) грунтов уточняются их свойства в зависимости от коэффициента пористости (e), коэффициента водонасыщения (S_r) [3]. Для всех видов грунтов (также по [3]) определяется их деформируемость (с использованием значений модуля деформации E).

На основании полученных сведений устанавливается пригодность представленных в инженерно-геологическом разрезе напластований грунтов для размещения в них различных типов свай.

1.2 Назначение глубины заложения подошвы ростверка и его высоты. Глубина заложения подошвы ростверка (d_p) – расстояние от уровня планировки грунта (DL) до уровня подошвы ростверка (FL); высота ростверка (H) – расстояние от уровня подошвы до верхнего обреза ростверка (рис. 1). Глубина заложения подошвы ростверка назначается с учетом конструктивных и планировочных решений (планировка грунта срезкой или подсыпкой, наличие подвала и т.п.), а также высоты ростверка. Глубина заложения подошвы ростверка для жилых и общественных бесподвальных зданий должна назначаться на 0,10–0,15 м ниже отметки планировки грунта, а в зданиях с подвалами и техническими подпольями – на отметке пола подвала (подполья) или ниже ее. Принятая по конструктивным требованиям

глубина заложения подошвы ростверка должна быть уточнена и (при необходимости) скорректирована с учетом возможного проявления сил морозного пучения грунта. В пучинистых при промерзании грунтах глубина заложения подошвы ростверка назначается не меньше расчетной глубины промерзания (d_f). Подробно принципы и методика выбора глубины заложения подошвы ростверка (фундамента) приведены в нормативной литературе [4] и методических указаниях по выполнению курсового проекта [1].

Высота ростверка зависит от глубины его заложения в грунт и способа соединения надземных конструкций с телом ростверка: под стены здания – не менее 0,3 м; под сборные железобетонные колонны – в зависимости от глубины заделки колонны в ростверк с учетом толщины дна стакана (не менее 0,4 м); под колонны с анкерным креплением – в зависимости от длины анкеров с учетом защитного слоя под их нижними торцами (≥ 100 мм). Высоту ростверка рекомендуется назначать кратной 0,15 м с округлением в большую сторону (с целью возможности применения инвентарной опалубки). В любом случае принятые размеры ростверка должны быть проверены прочностными расчетами его тела по правилам проектирования строительных конструкций из соответствующих материалов (бетон, сталь, дерево).

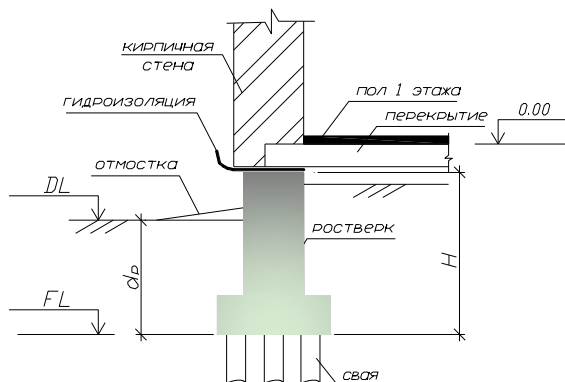


Рис. 1. Глубина заложения подошвы (d_p) и высота (H) ростверка

1.3 Выбор типа, длины, сечения и марки свай. В соответствии с современными нормами [2], при устройстве фундаментов могут использоваться разнообразные типы свай: забивные, вдавливаемые, вибропогружные, набивные, буровые, винтовые и т.д., а также их комбинации – комбинированные сваи. Выбор типа сваи зависит от конструктивных особенностей и места расположения здания (сооружения), вида и значений внешних силовых воздействий, физико-механических свойств грунтовых напластований, возможностей строительной индустрии и т.п.

Длина сваи назначается в зависимости от выбранной ранее глубины заложения подошвы ростверка и расположения несущего слоя грунта, в который предполагается заглублять нижние концы свай. Заглубление ($h_{заг}$) (например, забивных свай в несущий слой грунта), в соответствии с [2, п. 8.14], должно составлять, как правило, в крупнообломочные, гравелистые, крупные песчанистые и глинистые грунты с показателем текучести $I_L \leq 0,1$ – не менее 0,5 м, а в другие дисперсные грунты – не менее 1,0 м. При погружении сваи со дна котлована (выемки) глубиной ($d_p + 0,1$) м (где 0,1 м – толщина планируемой бетонной подготовки под монолитным ростверком) над поверхностью грунта должен быть оставлен отрезок («голова» сваи) для сопряжения с ростверком (при жесткой заделке – не менее 0,3 м над уровнем верхней грани бетонной подготовки; при шарнирной – не менее 0,05 м).

Выбор несущего слоя грунта для опирания нижнего конца свай может быть осуществлен согласно следующим рекомендациям. В случае если в инженерно-геологическом разрезе строительной площадки присутствуют только песчаные грунты различной крупности и пористости, то предпочтение следует отдавать пескам с более крупной фракцией зерен (разновидности песков по крупности частиц – гравелистые, крупные, средней крупности, мелкие и пылеватые) и наибольшей плотностью сложения (разновидности песков по коэффициенту пористости (e) – плотные, средней плотности, рыхлые). Если основание представлено только глинистыми грунтами различного вида и мощности, то за несущий слой грунта может быть принят тот,

показатель текучести (I_L) которого имеет наименьшее значение. При наличии в инженерно-геологическом разрезе строительной площадки (рис. 2) как песчаных, так и глинистых грунтов, допускается несущий слой грунта назначать по расчетному сопротивлению грунтов (R_0), определенному по [4, прил. Б]. За несущий пласт грунта принимается слой, обладающий наибольшим значением R_0 . При одинаковых значениях расчетного сопротивления слоев для заглубления нижних концов свай следует выбирать песчаные грунты (как менее подверженные влиянию водонасыщения в процессе эксплуатации здания (сооружения)). В любой ситуации предпочтительными для опирания нижних концов свай являются слои грунта, представленные крупнообломочными грунтами и всеми разновидностями скальных.

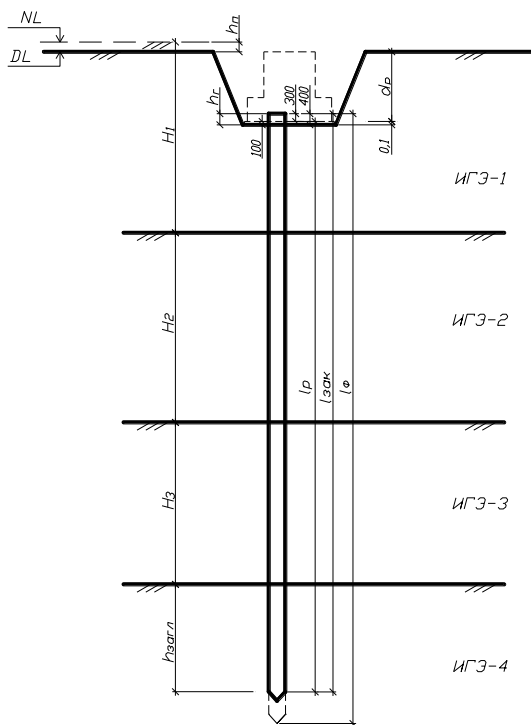


Рис. 2. Схема к определению длины свай

После выбора несущего слоя грунта выполняется «посадка» проектируемого свайного фундамента на инженерно-геологический разрез (см. рис. 2) и вычисляются длины свай: рабочая (l_p) и заказная ($l_{зак}$). При этом за рабочую длину свай принимается расстояние от подошвы ростверка до нижнего торца свай (для заостренных свай – без учета длины острия), она определяется выражением (обозначения см. на рис. 2)

$$l_p = \sum H_i - h_n - (d_p + 0,1). \quad (1)$$

Заказная длина свай устанавливается с учетом заделки свай в ростверк (например, для жесткого закрепления забивной свай она должна быть принята не менее 0,30 м: 0,25 м на отгибы продольной арматуры и 0,05 м на заделку свай в ростверк) и определяется выражением (обозначения см. на рис. 2)

$$l_{зак} = l_p + h_z. \quad (2)$$

Окончательно длина свай – фактическая (или стандартная) длина (l_ϕ), ее сечение и марка назначаются по номенклатуре изделий, предлагаемых предприятиями строительной индустрии (для свай, изготавливаемых вне строительной площадки). Для железобетонных свай заводского изготовления основные параметры свай определены госстандартом [5]. Например, цельная свая с ненапрягаемой арматурой, обозначаемая типом С, может иметь размеры поперечного сечения и соответствующую стандартную длину: 200×200 мм – от 3000 до 6000 мм (через 500 мм); 250×250 мм – от 4500 до 6000 мм (через 500 мм); 300×300 мм – от 3000 до 6000 мм (через 500 мм), от 6000 до 12 000 мм (через 1000 мм); 350×350 мм – от 4000 до 16 000 мм (шаг изменения длины зависит от серии – 500 или 1000 мм); 400×400 мм – от 4000 до 18 000 мм (шаг изменения длины зависит от серии – 500 или 1000 мм). Пример маркировки таких свай: С70.30-09, где С – тип свай (цельная квадратного сплошного сечения с ненапрягаемой стержневой арматурой и поперечным армированием ствола); 70 – длина свай от верхнего торца до начала острия, дм; 30 – размер стороны поперечного сече-

ния, см; 09 – порядковый номер варианта армирования в соответствии с рабочими чертежами. Для свай, изготавливаемых в грунте (буровые, набивные и т.п.), заказная длина может равняться фактической. Последняя зависит от технологических возможностей специализированного строительного оборудования, используемого для погружения сваи в грунт.

По фактической длине сваи (l_{ϕ}) производится корректировка глубины заделки сваи в несущий слой грунта (см. рис. 2).

1.4 Определение несущей способности сваи и допускаемой нагрузки на сваю. Этот расчет является одним из этапов расчета свайного основания по несущей способности (I ПС).

Тип сваи устанавливается по условиям взаимодействия с грунтом – свая-стойка или висячая свая (свая трения). К сваям-стойкам относят сваи всех видов, заглубленные в скальные грунты и/или прорезающие их, а также забивные сваи, опирающиеся нижними концами на слабдеформируемые грунты [3, табл. В.5] и передающие нагрузку на основание исключительно нижним концом. К висячим (сваям трения) относят сваи всех видов, опирающиеся на деформируемые грунты и передающие нагрузку на основание боковой поверхностью (так как возможно движение сваи в грунтовом массиве) и нижним концом сваи.

Несущую способность сваи-стойки необходимо определять по прочности грунта, на который она опирается (несущая способность по грунту), и прочности материала ствола сваи (несущая способность по материалу). Для дальнейших расчетов принимается меньшее из значений этих двух величин.

Несущая способность (F_d) сваи-стойки по грунту принимается равной несущей способности основания под нижним концом сваи (F_{db}) и определяется по [2, формула (7.6)]:

$$F_{db} = \gamma_c \cdot R \cdot A, \quad (3)$$

где γ_c – коэффициент ($\gamma_c = 1$);

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

A – площадь поперечного сечения сваи, м².

Несущая способность (F_d) сваи-стойки по материалу принимается равной несущей способности сечения ствола сваи (F_{dm}) и определяется в зависимости от вида материала, из которого изготовлена свая. Для железобетонной сваи значение F_{dm} может быть установлено на основе [6, формула (8.17)]:

$$F_{dm} = \varphi (\gamma_c \cdot \gamma_m \cdot R_b \cdot A + \gamma_a \cdot R_{sc} \cdot A_{s,tot}), \quad (4)$$

где $\varphi, \gamma_c, \gamma_m, \gamma_a$ – коэффициенты;

R_b – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию, кПа;

A – площадь поперечного (бетонного) сечения сваи, м²;

R_{sc} – расчетное сопротивление сжатой арматуры, кПа;

$A_{s,tot}$ – площадь сечения продольной арматуры, м².

Несущая способность (F_d) висячей забивной и вдавливаемой свай, а также железобетонной сваи-оболочки, погружаемой без выемки грунта, следует определять как сумму расчетных сопротивлений грунтов основания под нижним концом сваи и на ее боковой поверхности по [2, формула (7.9)]:

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{R,R} \cdot R \cdot A + u \sum \gamma_{R,f} \cdot f_i \cdot h_i), \quad (5)$$

где $\gamma_c, \gamma_{R,R}, \gamma_{R,f}$ – коэффициенты;

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

A – площадь опирания сваи на грунт, м²;

u – наружный периметр поперечного сечения сваи, м;

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

h_i – толщина i -го (элементарного) слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м.

Основные величины, входящие в формулу (5), показаны на рис. 3.

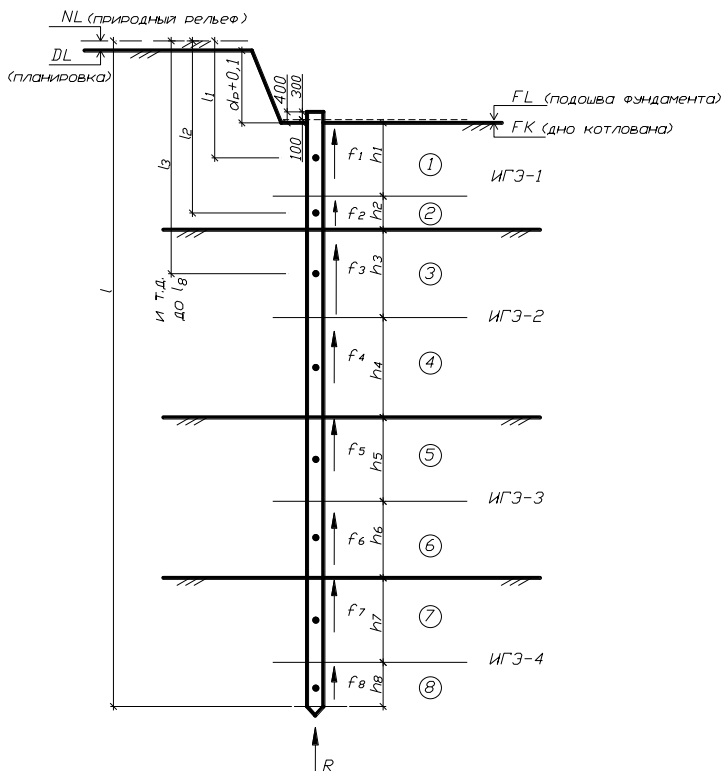


Рис. 3. Схема к расчету несущей способности висячей сваи

Допускаемая нагрузка на сваю ($F_{d,p}$) вычисляется в соответствии с [2, п. 7.1.11]:

$$F_{d,p} = \frac{F_d}{\gamma_{c,g}}, \quad (6)$$

где $\gamma_{c,g}$ – коэффициент надежности по грунту, принимаемый равным 1,4 при определении несущей способности сваи расчетом.

1.5 Определение необходимого количества свай в фундаменте, размеров ростверка и веса ростверка с грунтом на участках. Количество свай в фундаменте устанавливается из усло-

вия восприятия расчетных вертикальных нагрузок и изгибающих моментов, а также собственного веса ростверка и грунта на его уступах. В первом приближении необходимое количество свай определяется отношением расчетной вертикальной нагрузки, действующей от здания (сооружения) на фундамент, к допускаемой нагрузке на сваю, а действие моментов и вес ростверка с грунтом на его уступах принимаются равными 15 % от вертикальной нагрузки на ростверк. Таким образом, необходимое количество свай (n) будет определяться формулой

$$n = 1,15 \cdot N_0^P / F_{d,p}, \quad (7)$$

где 1,15 – коэффициент, учитывающий действие изгибающих моментов и вес ростверка с грунтом на уступах;

N_0^P – расчетная вертикальная нагрузка на уровне подошвы ростверка (без учета веса ростверка и грунта на его уступах), кН.

Количество свай принимается равным целому числу с округлением дробной части в большую сторону. При передаче на свайный фундамент моментных нагрузок количество свай назначается не менее двух (при действии момента в одном направлении) и не менее четырех (при действии моментов в двух направлениях). Размещение свай в кусте может быть принято в рядовом или шахматном порядке (рис. 4). Параметры типовых свайных групп (кустов) из свай различного типа для промышленных зданий приведены в [7]. При расположении свай в кустах (в фундаментах под колонны) следует стремиться к минимальному шагу свай. Расстояние между осями висячих забивных и вдавливаемых свай в плоскости их нижних концов должно быть не менее $3d$, максимальное расстояние не рекомендуется более $6d$ (где d – диаметр круглого или сторона квадратного, или большая сторона прямоугольного поперечного сечения ствола сваи). Для свай-стоек минимальное расстояние между осями $1,5d$. Расстояние в свету между стволами буровых, набивных свай и свай-оболочек должно быть не менее 0,5 м, а между уширениями или лопастями винтовых свай при устройстве их в твердых и полутвердых глинистых грунтах – 0,5 м, в других дисперсных грунтах – 1,0 м.

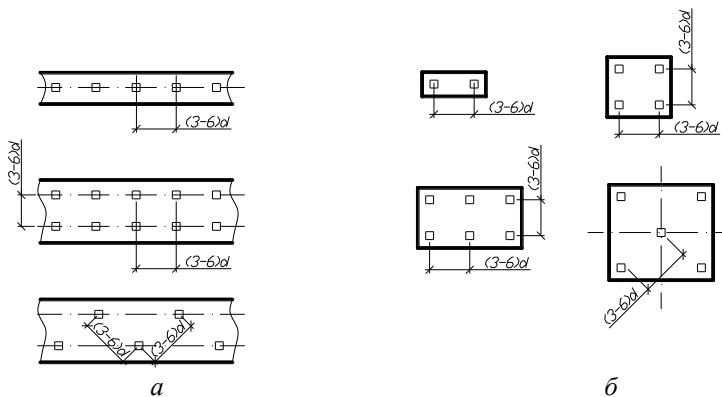


Рис. 4. Размещение свай в ростверке:
a – под стены (ленточный ростверк);
б – под колонны (столбчатые ростверки)

Размеры ростверка в плане зависят от количества рядов свай, расстояния между осями свай и свободных свесов ростверка над наружными гранями свай. При этом свес ростверка (расстояние от вертикальной грани его плиты до наружной грани свай) обычно принимается в пределах 100–150 мм. Размеры ростверка в плане не должны быть меньше конструктивных (размеров верхнего обреза), назначенных в зависимости от типа и размеров опирающихся на него надземных строительных элементов (стена, колонна и т.п.). Если полученные расчетные размеры ростверка меньше конструктивных, то за его размеры следует принять размеры верхнего обреза, затем произвести раздвижку свай в плане. Также необходимо учесть, что размеры подошвы ростверка принимаются кратными 300 мм. Например, при рядовом расположении свай ширина (*b*) и длина (*l*) ростверка в плане могут быть определены по формулам:

$$b = (n_1 - 1)a + d + 2c; \quad l = (n_2 - 1)a + d + 2c, \quad (8)$$

где n_1, n_2 – количество свай в ряду в направлении сторон *b* и *l* соответственно;

a – расстояние между осями свай в ряду;

d – размер поперечного сечения свай;

c – свес ростверка над гранью свай.

По принятым габаритным размерам ростверка (высота, ширина и длина) в первом приближении (до окончательного конструирования ростверка) определяется его вес совместно с весом грунта на уступах:

$$G_{p, \text{зр}}^p = \gamma_f \cdot H \cdot b \cdot l \cdot \gamma_{\text{м}}, \quad (9)$$

где γ_f – коэффициент надежности по нагрузке (может быть принят 1,1);

H, b, l – габаритные размеры ростверка, м;

$\gamma_{\text{м}}$ – осредненный удельный вес материала фундамента и грунта (может быть принят 21 кН/м³).

1.6 Определение расчетных нагрузок на сваи, проверка достаточности принятого количества свай, уточнение количества свай в фундаменте. Для фундаментов с вертикальными сваями расчетная нагрузка на наиболее (N_{max}) и наименее (N_{min}) нагруженные сваи, в соответствии с [2, п. 2.1.12], может быть определена по формуле (см. также рис. 5)

$$N_{\text{max}}^{\text{min}} = \frac{N^p + G_{p, \text{зр}}^p}{n} \pm \frac{M_{\text{oy}}^p \cdot x_{\text{max}}^{\text{min}}}{\sum x_i^2} \pm \frac{M_{\text{ox}}^p \cdot y_{\text{max}}^{\text{min}}}{\sum y_i^2}, \quad (10)$$

где N^p – расчетная вертикальная нагрузка, передающаяся на верхний обрез ростверка, кН;

$G_{p, \text{зр}}^p$ – вес ростверка и грунта на его уступах (см. формулу (9)), кН;

n – количество свай в фундаменте (кусте);

$M_{\text{oy}}^p, M_{\text{ox}}^p$ – расчетные изгибающие моменты в плоскости подошвы фундамента относительно главных центральных осей x и y соответственно;

$x_{\text{max}}^{\text{min}}, y_{\text{max}}^{\text{min}}$ – расстояния от главных осей до осей максимально и/или минимально нагруженной сваи (при определении расчетной нагрузки на любую сваю расстояния x и y принимаются до оси сваи, для которой вычисляется расчетная нагрузка), кН;

x_i, y_i – расстояния от главных осей до оси каждой сваи, м.

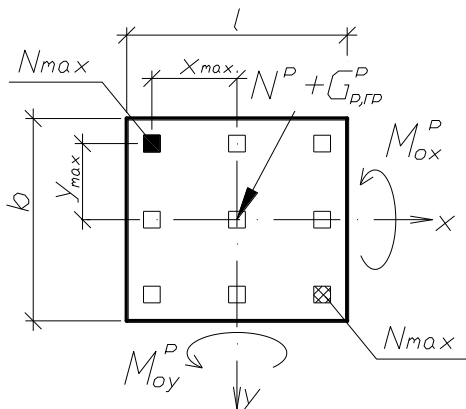


Рис. 5. Схема к определению максимальной и минимальной расчетных нагрузок на сваи

Проверка достаточности принятого количества свай заключается в сравнении максимальной расчетной нагрузки на сваю ($N_{\max}$) с допускаемой на сваю нагрузкой ($F_{d,p}$), а минимальной расчетной нагрузки ($N_{\min}$) – с числом ноль. При этом должны выполняться следующие условия:

$$\gamma_n \cdot N_{\max} \leq F_{d,p}; \quad \gamma_n \cdot N_{\min} \geq 0, \quad (11)$$

где γ_n – коэффициент надежности по назначению (ответственности) сооружения (принимается по [8], $\gamma_n \geq 1$).

При невыполнении условий (11) необходимо перепроектировать фундамент. Это может быть достигнуто увеличением количества свай, повышением их несущей способности, иной схемой размещения свай в кусте. Повышение несущей способности осуществляется за счет увеличения длины сваи или размеров ее поперечного сечения. Расчет выполняется до тех пор, пока не будут выполнены условия (11). Выполнение первого из них с большим запасом может свидетельствовать о возможности уменьшения длины свай или их количества.

1.7 Конструирование ростверка. Ростверк конструируется аналогично фундаменту мелкого заложения (например, см. [9]). Назначаемые при необходимости ступени (уступы) ростверка должны быть кратными 150 мм (начиная с 300 мм). При этом размеры высоты и вылета одной ступени могут не совпадать. Также ступени разных уровней (слоев) могут отличаться по размерам. Желательно, чтобы ступень, располагающаяся по периметру фундамента, имела одну высоту.

1.8 Определение осадки основания свай и свайного фундамента от вертикальной нагрузки. Этот расчет относится к категории расчетов по деформациям (II ПС) и выполняется в соответствии с [2, п. 7.4].

Нормы [2] предлагают определять осадку свай и свайных фундаментов в зависимости от количества свай в ростверке по нескольким методикам: осадка одиночной сваи, осадка малой группы ($n \leq 25$) висячих свай (свайного куста) с учетом взаимного влияния свай в кусте и осадка большой группы ($n > 25$) висячих свай (свайного поля) с использованием модели условного фундамента на естественном основании.

Осадку одиночной висячей сваи без уширения пяты определяется по [2, формула (7.34)]:

$$s = \beta \frac{N}{G_1 \cdot l}, \quad (12)$$

где β – коэффициент, зависящий от упругих свойств грунтов, в которые погружена свая, и жесткости ствола сваи;

N – нормативная вертикальная нагрузка, передаваемая на сваю, МН;

G_1 – модуль сдвига грунта, прорезаемого свайей, МН;

l – длина сваи, м.

Расчет осадки малой группы висячих свай выполняется с учетом их взаимного влияния и для произвольной сваи в кусте осуществляется по [2, формула (7.42)]:

$$s_i = s(N_i) + \sum_{j \neq i} \delta_{ij} \cdot \frac{N_j}{G_1 \cdot l}, \quad (13)$$

где $s(N_i)$ – осадка одиночной сваи, определяемая по формуле (12);

δ_{ij} – коэффициент, зависящий от расстояния между i -й и j -й сваями;

N_j – нормативная нагрузка на j -ю сваю.

Расчет осадки большеразмерного свайного фундамента (свайного поля) следует выполнять по [2, формула (7.45)]:

$$s = s_{ef} + \Delta s_p + \Delta s_c, \quad (14)$$

где s_{ef} – осадка условного фундамента, определяемая по методу послойного суммирования [4] (границы условного фундамента устанавливаются в соответствии с рекомендациями [2, п. 7.4.9]);

Δs_p – дополнительная осадка за счет продавливания свай на уровне подошвы условного фундамента [2, п. 7.4.10];

Δs_c – дополнительная осадка за счет сжатия ствола свай [2, п. 7.4.11].

1.9 Проверка допустимости расчетных деформаций оснований свай и свайных фундаментов. Полученные расчетом деформации (в данном случае – осадки) следует сравнивать с предельными значениями деформаций (осадок), руководствуясь условием [2, формула (7.4)]

$$s \leq s_u, \quad (15)$$

где s – совместная деформация основания сваи, свайного фундамента и сооружения, определенная расчетом (см. выше);

s_u – предельное значение совместной деформации основания сваи, свайного фундамента, определяемое заданием на проектирование или устанавливаемое в соответствии с [4, прил. Г].

При невыполнении условия (15) следует увеличить количество свай и сделать перерасчет.

1.10 Прочностной расчет ростверка с назначением необходимого армирования. Методика расчета ростверка по прочно-

сти в настоящих методических указаниях не приводится. Основные положения по расчету (например, железобетонных ростверков в зависимости от их конструктивных особенностей) изложены в [6, 7]. В частности, ростверк под колонну предполагается рассчитывать: на продавливание колонной; на продавливание угловой сваей; на поперечную силу в наклонных сечениях; на изгиб; на местное смятие под торцом сборной колонны; на прочность стальной части; на раскрытие трещин (для гибких ростверков).

1.11 Дополнительные расчеты. К дополнительным расчетам при проектировании фундаментов из забивных свай следует отнести подбор сваебойного оборудования для погружения сваи в грунт и определение контрольного (проектного) отказа сваи.

Последовательность подбора молота для погружения (забивки) сваи [7]: вычисляется минимальная требуемая энергия удара $\mathcal{E}$ по [7, формула (8.21)]; по [7, табл. 8.29–8.31] подбирается молот, энергия удара которого соответствует определенной ранее минимальной энергии удара; проводится проверка пригодности молота по [7, формула (8.22)], в случае невыполнения условия принимается молот с большей энергией удара и проверка повторяется.

Контрольный (проектный) отказ сваи (S_a) (погружение сваи от одного удара молота) может быть определен по формуле

$$S_a = \frac{n \cdot A \cdot Q \cdot H}{F_u^2 + F_u \cdot A \cdot n} \cdot \frac{Q_0 + 0,2 \cdot q}{Q_0 + q}, \quad (16)$$

где n – коэффициент, зависящий от материала сваи (для железобетонной сваи 1500 кПа);

A – площадь поперечного сечения сваи, м^2 ;

Q – вес ударной части молота, кН;

H – высота падения ударной части молота, м;

F_u – частное предельное сопротивление сваи вертикальной нагрузке, кН;

Q_0 – полный вес молота, кН;

q – вес сваи с наголовником, кН.

2 Пример расчета свайного фундамента

2.1 Постановка задачи и исходные сведения для расчета

Требуется запроектировать свайный фундамент под сборную железобетонную колонну при следующих исходных данных:

- место строительства г. Новосибирск;
- размеры обреза фундамента: $b_{об} = 1,5$ м; $l_{об} = 1,8$ м;
- отметка низа колонны $HK = -1.30$;
- отметка планировки $DL = -0.22$;
- грунтовые воды *отсутствуют*;
- нагрузки, действующие на обрез фундамента:

$$N_{\kappa}^H = 2024,7 \text{ кН}; \quad M_{\kappa\kappa}^H = 64,2 \text{ кН}\cdot\text{м}; \quad Q_{\kappa\kappa}^H = 19 \text{ кН}; \quad M_{\kappa\gamma}^H =$$

$$= 120 \text{ кН}\cdot\text{м}; \quad Q_{\kappa\gamma}^H = 29,2 \text{ кН};$$

- здание *отопливаемое* ($t = 13$ °С), *без подвала, с полами по грунту*;
- число слоев (напластований) грунта в разрезе – *два*;
- мощности слоев: *ИГЭ-1 (верхний) 6,3 м,*
ИГЭ-2 (подстилающий) 20 м;
- физико-механические характеристики грунтов:

Наименование грунта	ρ_s , т/м ³	ρ_{Π} , т/м ³	w , %	w_p , %	w_L , %	φ_{Π} , град.	c_{Π} , кПа	E , МПа
ИГЭ-1. Глина	2,73	1,98	30,4	17,0	47,0	9	26	10,5
ИГЭ-2. Песок средней крупно- сти	2,66	2,1	21	–	–	39	1	29,0

За отметку 0.00 принят уровень чистого пола первого этажа, совпадающего (в данном случае) с уровнем природного рельефа (NL).

Инженерно-геологический разрез приведен на рис. 6.

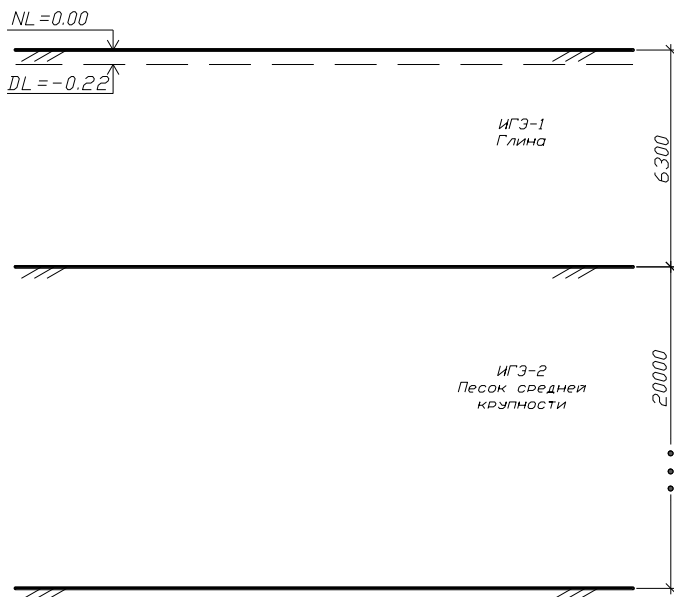


Рис. 6. Инженерно-геологический разрез

2.2 Проектирование и расчет свайного фундамента

2.2.1 Определение глубины заложения подошвы ростверка (d_p)

1 Конструктивная глубина заложения подошвы ростверка (d_k) определяется из условий заделки колонны:

– минимальная (требуемая) глубина заложения подошвы ростверка

$$d_{k,\min} = (1,30 - 0,22) + 0,05 + 0,4 = 1,53 \text{ м};$$

– конструктивная глубина заложения подошвы ростверка, исходя из кратности опалубки (кратность по высоте 150 мм), принята $d_k = 1,65 \text{ м}$ (рис. 7).

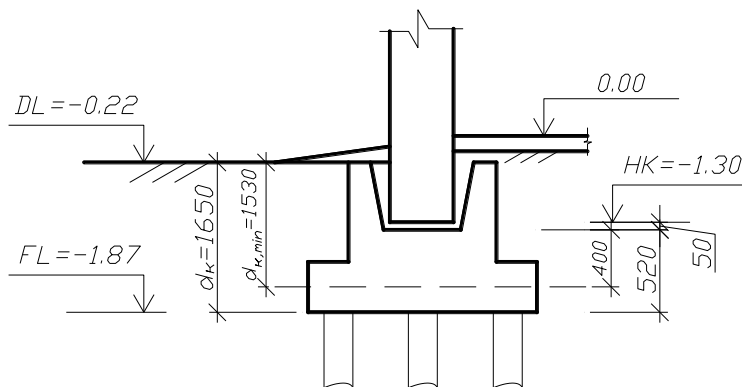


Рис. 7. Схема к определению конструктивной глубины заложения подошвы фундамента

2 Глубина заложения подошвы ростверка уточняется из условий глубины сезонного промерзания и оттаивания грунта:

– нормативная глубина сезонного промерзания грунта (d_{fn}) определяется по [4, формула (5.3)]:

$$d_{fn} = d_0 \sqrt{M_t} = 0,23 \sqrt{63,1} = 1,83 \text{ м,}$$

где $d_0 = 0,23 \text{ м}$ – величина для глин, принимаемая по [4, п. 5.5.3], м;

$M_t = |-17,6 - 15,8 - 8,0 - 7,3 - 14,4| = 63,1$ – безразмерный коэффициент, численно равный сумме абсолютных значений среднемесячных отрицательных температур за год для г. Новосибирска (температуры приняты по [10, табл. 5.1]);

– расчетная глубина сезонного промерзания и оттаивания грунта (d_f) (с учетом влияния здания или сооружения) определяется по [4, формула (5.4)]:

$$d_f = k_h \cdot d_{fn} = 0,7 \cdot 1,83 = 1,28 \text{ м,}$$

где $k_h = 0,7$ – коэффициент, учитывающий влияние теплового режима сооружения, принимаемый для наружных фундаментов отапливаемых сооружений по [4, табл. 5.2];

– окончательная глубина заложения подошвы фундамента определяется следующим образом. Зависимость глубины заложения

жения подошвы ростверка (d) от расчетной глубины сезонного промерзания (d_f) устанавливается по [4, табл. 5.3]. Под подошвой располагается глина с $I_L = 0,45$ д. ед. Грунтовые воды не обнаружены, следовательно, $d_w = \infty$ больше, чем $d_f + 2 = 1,28 + 2 = 3,28$ м. При данных условиях глубина заложения подошвы фундамента должна быть не менее d_f (для предотвращения возникновения лобовых сил морозного пучения). Назначенная конструктивная глубина заложения $d_k = 1,65$ м больше $d_f = 1,28$ м, следовательно, для дальнейших расчетов принимаем $d_p = 1,65$ м.

2.2.2 Приведение нагрузок к центру подошвы ростверка

Приведение нагрузок, действующих на верхний обрез ростверка, к центру его подошвы выполняется по правилам строительной механики. Расположение нагрузок на верхнем обрезе ростверка показано на рис. 8.

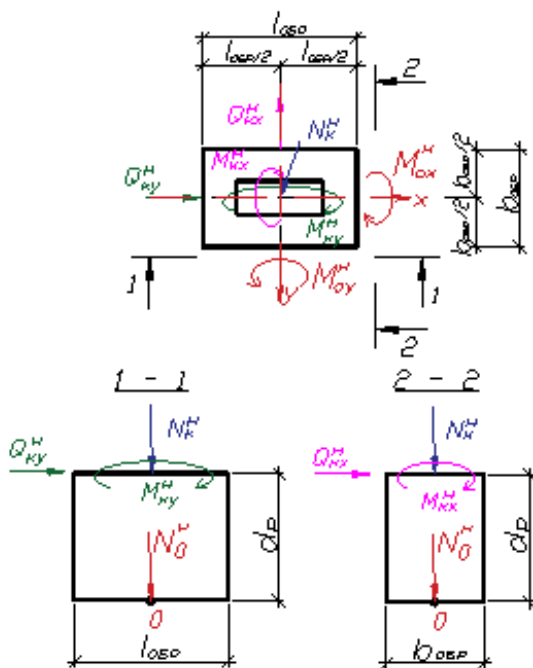


Рис. 8. Приведение нагрузок к центру подошвы ростверка

Таким образом, нормативные значения нагрузок, приведенных к центру подошвы ростверка (см. рис. 8):

$$N_0^H = N_K^H = 2024,7 \text{ кН};$$

$$M_{ox}^H = M_{Kx}^H + Q_{Kx}^H \cdot d = 64,2 + 19 \cdot 1,65 = 95,6 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{oy}^H = M_{Ky}^H + Q_{Ky}^H \cdot d = 120 + 29 \cdot 1,65 = 168,2 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Расчетные значения нагрузок, приведенных к центру подошвы ростверка:

$$N_0^P = N_0^H \cdot \gamma_{f1} = 2024,7 \cdot 1,1 = 2227,2 \text{ кН};$$

$$M_{ox}^P = M_{ox}^H \cdot \gamma_{f1} = 95,6 \cdot 1,1 = 105,2 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{oy}^P = M_{oy}^H \cdot \gamma_{f1} = 168,2 \cdot 1,1 = 185,0 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $\gamma_{f1} = 1,1$ – коэффициент надежности по нагрузке.

2.2.3 Назначение типа, длины и марки сваи

Сваи в рассматриваемом примере принимаются железобетонные, квадратного сплошного сечения 300×300 мм, погружаемые в грунт забивкой дизель-молотом. Нижний конец сваи может быть заглублен в ИГЭ-I или ИГЭ-II. При заглублении сваи в слой грунта ИГЭ-I (глина) длина сваи получается небольшой (около 3 м). Кроме того, этот слой грунта имеет значение расчетного сопротивления (R_0 по [4, табл. Б.8]) меньше, чем аналогичный показатель (R_0 по [4, табл. Б.7]) для слоя грунта ИГЭ-II (песок средней крупности). Опираем нижний конец сваи в слой ИГЭ-II минимум на 1,0 м в соответствии с [2, п. 8.14] (рис. 9). Также при назначении длины сваи следует учесть толщину подбетонки (100 мм) и отрезок сваи, необходимый для жесткой ее заделки в ростверк (300 мм):

$$l_{св}^P = 0,3 + 0,1 + h_1 + h_{загл} = 0,3 + 0,1 + 4,33 + 1,0 = 5,73 \text{ м}.$$

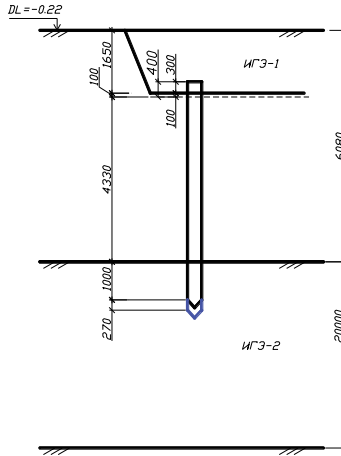


Рис. 9. Схема к определению длины свай

Окончательно принять длину свай необходимо в соответствии с номенклатурой свай, выпускаемых заводами строительной индустрии, соблюдая условие, что длина принятой сваи не должна быть менее требуемой. Принимаем $l = 6,0$ м, тогда марка сваи С60.30-01 (здесь 60 – длина свай, дм; 30 – размер поперечного сечения, см; 01 – порядковый номер варианта армирования).

2.2.4 Расчет по несущей способности (I ПС)

1 Определение несущей способности свай.

Опорный пласт (ИГЭ-II) является деформируемым грунтом, следовательно, свая по условиям взаимодействия с грунтом – висячая. Несущую способность висячей сваи по грунту следует определять по [2, формула (7.9)]:

$$F_d = \gamma_c \left(\gamma_{R,R} \cdot R \cdot A + u \sum \gamma_{R,f} \cdot f_i \cdot h_i \right),$$

где $\gamma_c = 1$ – коэффициент условий работы сваи в грунте;

$\gamma_{R,R}$, $\gamma_{R,f}$ – коэффициенты условия работы грунта соответственно под нижним концом и на боковой поверхности сваи, принимаемые по [2, табл. 7.4] (при погружении свай с закрытым нижним концом забивкой $\gamma_{R,R} = 1,0$, $\gamma_{R,f} = 1,0$);

R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, принимаемое по [2, табл. 7.2];

$A = 0,09 \text{ м}^2$ – площадь опирания сваи на грунт;

$u = 1,2 \text{ м}$ – наружный периметр поперечного сечения ствола сваи;

f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта основания на боковой поверхности сваи, принимаемое по [2, табл. 7.3];

h_i – толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи (принимается не более 2 м).

Схема (разбивка на слои, глубина погружения нижнего конца сваи и средняя глубина расположения слоев грунта) для определения F_d приведена на рис. 10. Глубина погружения нижнего конца сваи и средняя глубина расположения слоя грунта при планировке территории срезкой до 3 м (планировочная отметка территории в данном примере $-0,22$) принимается от отметки природного рельефа [2, п. 2 примечания к табл. 7.2].

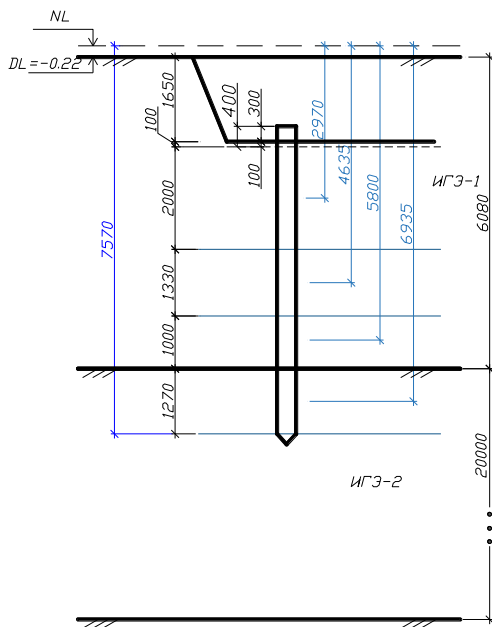


Рис. 10. Схема к определению несущей способности сваи

В соответствии с [2, п. 4 примечания к табл. 7.2], для плотных песков значения R следует увеличивать на 60 % (если плотность грунта определена не по данным статического зондирования). Согласно [2, п. 3 примечания к табл. 7.3], для плотных песков значения f_i следует увеличивать на 30 %. Для ИГЭ-II (опорный слой грунта, песок средней крупности) необходимо определить коэффициент пористости

$$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} = \frac{2,66 - 1,74}{1,74} = 0,53 \text{ д. ед.};$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w} = \frac{2,1}{1 + 0,21} = 1,74 \text{ г/см}^3.$$

При $e = 0,53 < 0,55$ д. ед. [3, табл. Б.10] грунт плотный. В этом случае расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи

$$R = 3757 \cdot 1,6 = 6011,2 \text{ кПа.}$$

Результаты определения расчетного сопротивления грунта по боковой поверхности сваи сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения расчетного сопротивления грунта по боковой поверхности сваи

l_i , м	f_i , кПа	h_i , м	$f_i \cdot h_i$, кН/м
2,970	22,4	2,00	44,80
4,635	25,8	1,33	34,31
5,800	27,7	1,00	27,70
6,935	$59,87 \cdot 1,3 = 77,8$	1,27	98,81
Σ			205,6

Соответственно,

$$F_d = 1(1 \cdot 6011,2 \cdot 0,09 + 1 \cdot 1,2 \cdot 205,6) = 787,72 \text{ кН.}$$

2 Определение количества свай в кусте:

$$n = \frac{N_0^p}{F_d / \gamma_{c,g}} 1,15 = \frac{2227,2}{787,72 / 1,4} 1,15 = 4,55,$$

где $\gamma_{c,g} = 1,4$ – коэффициент надежности по грунту (зависит от метода определения несущей способности), устанавливаемый по [2, п. 7.1.11].

Таким образом, принимаем пять свай в кусте.

3 Компоновка свайного куста и определение размеров подошвы ростверка.

Принятое количество свай располагаем в шахматном порядке, свесы ростверка принимаем по 100 мм в каждую сторону. Расстояние между осями свай должно быть не менее $3d = 900$ мм (так как сваи забивные), размеры ростверка в плане – не менее размеров обреза и кратны 300 мм (кратность опалубки). Компоновка и размеры подошвы ростверка в плане приведены на рис. 11.

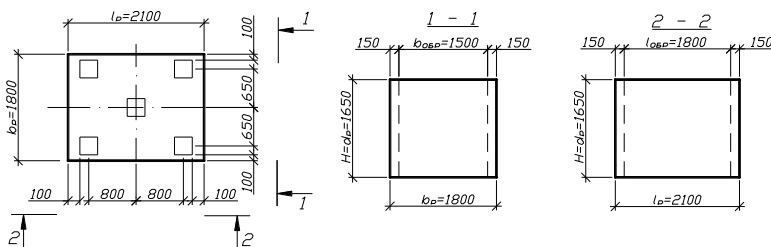


Рис. 11. Компоновка свайного куста и конструирование ростверка

4 Определение нагрузок на максимально и минимально нагруженные сваи (рис. 12).

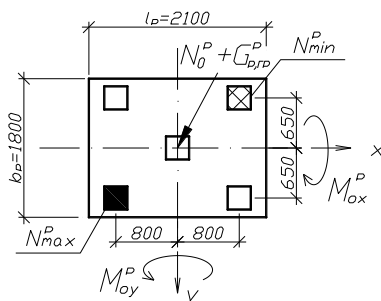


Рис. 12. Схема к определению нагрузок на максимально и минимально нагруженные сваи

Расчетную нагрузку на сваю для фундаментов с вертикальными сваями, объединенных жестким ростверком, определяют по [2, формула (7.3)]:

$$N_{\min}^p = \frac{N_0^p + G_{p,cp}^p}{n} \pm \frac{M_{oy}^p \cdot x_{\max}}{\sum x_i^2} \pm \frac{M_{ox}^p \cdot y_{\max}}{\sum y_i^2} =$$

$$= \frac{2227,2 + 171,5}{5} \pm \frac{185 \cdot 0,8}{4 \cdot 0,8^2} \pm \frac{105,2 \cdot 0,65}{4 \cdot 0,65^2} = 479,7 \pm 57,8 \pm 40,5 \text{ кН},$$

где $N_0^p = 2227,2 \text{ кН}$ – расчетная сжимающая нагрузка, передаваемая в уровне подошвы ростверка без учета веса ростверка и грунта на его уступах;

$G_{p,cp}^p$ – расчетная нагрузка от веса ростверка и грунта на уступах:

$$G_{p,cp}^p = V_{\phi} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_{f1} = 1,8 \cdot 2,1 \cdot 1,65 \cdot 25 \cdot 1,1 = 171,5 \text{ кН};$$

$n = 5$ – число свай в фундаменте;

$M_{oy}^p = 185 \text{ к}\cdot\text{Нм}$; $M_{ox}^p = 105,2 \text{ к}\cdot\text{Нм}$ – расчетные изгибающие моменты в плоскости подошвы ростверка относительно главных центральных осей;

$x_{\max}$, $y_{\max}$ – расстояния от центральных осей до оси максимально (минимально) нагруженной сваи, м;

x_i , y_i – расстояния от центральных осей до оси каждой сваи, м.

Расчетное сопротивление i -го слоя грунта основания на боковой поверхности сваи (f_i) принимается по [2, табл. 7.3].

Таким образом,

$$N_{\max}^p = 578,0 \text{ кН},$$

$$N_{\min}^p = 381,4 \text{ кН}.$$

5 Проверка выполнения условий.

При внецентренно загруженном свайном фундаменте должны выполняться одновременно два условия:

$$\begin{cases} \gamma_n \cdot N_{\max}^p \leq \frac{F_d}{\gamma_{c,g}} \\ \gamma_n \cdot N_{\min}^p \geq 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1 \cdot 578,0 \geq \frac{787,72}{1,4} = 562,7 \\ 1 \cdot 381,4 \geq 0, \end{cases}$$

где $\gamma_n = 1$ – коэффициент надежности по ответственности сооружения (принимается для КС-2 по [8, табл. 2]).

Первое условие не выполняется. Необходимо увеличить число свай в кусте или длину свай, или размеры ее поперечного сечения.

Увеличиваем число свай, принимая $n = 6$. Новая компоновка куста свай и размеры ростверка приведены на рис. 13. В этом случае

$$\begin{aligned} G_{p,cp}^p &= \gamma_{f_1} (l_{обp} \cdot b_p \cdot h_{np} + l_p \cdot b_p \cdot h_n) \gamma_b + 2 \gamma_{f_2} \cdot b_p \cdot a \cdot h_{np} \cdot \gamma_{II} = \\ &= 1,1(1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,35 + 2,4 \cdot 1,8 \cdot 0,3) 25 + 2 \cdot 1,15 \cdot 1,8 \cdot 0,3 \cdot 1,35 \cdot 20,6 = \\ &= 155,9 + 34,5 = 190,4 \text{ кН}, \end{aligned}$$

где $\gamma_{f_1} = 1,1$ и $\gamma_{f_2} = 1,15$ – коэффициенты надежности по нагрузке;

$\gamma_{II} = \rho_{II} \cdot g = 2,1 \cdot 9,81 = 20,6 \text{ кН/м}^3$ – удельный вес грунта на уступах;

остальные обозначения см. на рис. 13.

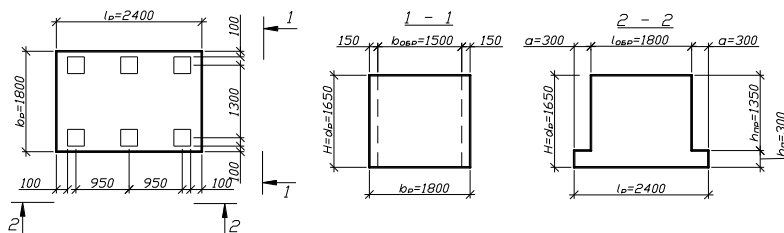


Рис. 13. Компоновка свайного куста и конструирование ростверка

В соответствии с рис. 14:

$$\begin{aligned} N_{\min}^p &= \frac{N_0^p + G_{p,cp}^p}{n} \pm \frac{M_{oy}^p \cdot x_{\max}}{\sum x_i^2} \pm \frac{M_{ox}^p \cdot y_{\max}}{\sum y_i^2} = \\ &= \frac{2227,2 + 190,4}{6} \pm \frac{185 \cdot 0,95}{4 \cdot 0,95^2} \pm \frac{105,2 \cdot 0,65}{6 \cdot 0,65^2} = 402,9 \pm 48,7 \pm 27 \text{ кН}. \end{aligned}$$

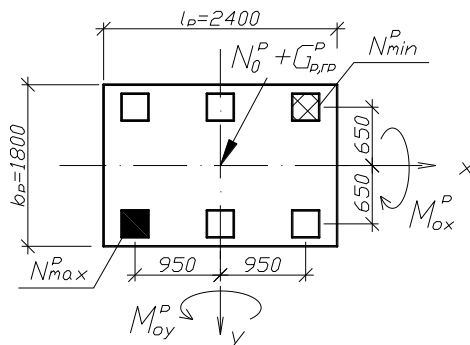


Рис. 14. Схема к определению нагрузок на сваи

Таким образом,

$$N_{\max}^P = 478,6 \text{ кН},$$

$$N_{\min}^P = 327,2 \text{ кН}.$$

Проверка выполнения условий:

$$\begin{cases} \gamma_n \cdot N_{\max}^P \leq \frac{F_d}{\gamma_{c,g}} \\ \gamma_n \cdot N_{\min}^P \geq 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1 \cdot 478,6 \leq \frac{787,72}{1,4} = 562,7 \\ 1 \cdot 327,2 \geq 0. \end{cases}$$

Условия выполняются (недонапряжение составляет 14,9 %). Далее необходимо произвести расчеты по деформациям: определить осадку фундамента (s) и выполнить проверку условия $s \leq s_u$.

2.2.5 Расчет по деформациям (II ПС)

Поскольку принятое количество свай в фундаменте $n = 6$ (< 25), расчет выполняется по методике, рекомендованной для малой группы свай, учитывающей взаимное влияние свай в кусте (в соответствии с [2, п. 7.4.5]).

1 Определение нормативных нагрузок на каждую сваю в кусте по [2 формула (7.3)] (рис. 15):

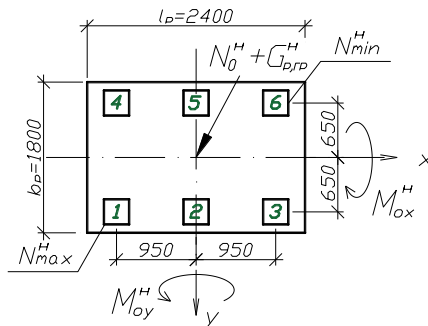


Рис. 15. Схема к определению нагрузок на сваи № 1–6

$$G_{p,гp}^H = (l_{оп} \cdot b_p \cdot h_{np} + l_p \cdot b_p \cdot h_n) \gamma_b + b_p \cdot a \cdot h_{np} \cdot \gamma_{II} = (1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,35 + 2,4 \cdot 1,8 \cdot 0,3) 25 + 2 \cdot 1,8 \cdot 0,3 \cdot 1,35 \cdot 20,6 = 141,75 + 30,04 = 171,78 \text{ кН};$$

$$N_i^H = \frac{N_0^H + G_{p,гp}^H}{n} \pm \frac{M_{oy}^H \cdot x_{\max}}{\sum x_i^2} \pm \frac{M_{ox}^H \cdot y_{\max}}{\sum y_i^2} =$$

$$= \frac{2024,7 + 171,78}{6} \pm \frac{168,2 \cdot 0,95}{4 \cdot 0,95^2} \pm \frac{95,6 \cdot 0,65}{6 \cdot 0,65^2} = 366,1 \pm 44,3 \pm 24,59 \text{ кН}.$$

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 15, вертикальные нормативные нагрузки на сваи № 1–6 составят:

$$N_1^H = N_{\max}^H = \frac{N_0^H + G_{p,гp}^H}{n} + \frac{M_{oy}^H \cdot x_{\max}}{\sum x_i^2} + \frac{M_{ox}^H \cdot y_{\max}}{\sum y_i^2} = 366,1 + 44,3 + 24,5 = 434,9 \text{ кН};$$

$$N_2^H = \frac{N_0^H + G_{p,гp}^H}{n} + \frac{M_{ox}^H \cdot y_{\max}}{\sum y_i^2} = 366,1 + 24,5 = 390,6 \text{ кН};$$

$$N_3^H = \frac{N_0^H + G_{p,гp}^H}{n} - \frac{M_{oy}^H \cdot x_{\max}}{\sum x_i^2} + \frac{M_{ox}^H \cdot y_{\max}}{\sum y_i^2} = 366,1 - 44,3 + 24,5 = 346,3 \text{ кН};$$

$$N_4^H = \frac{N_0^H + G_{p,гp}^H}{n} + \frac{M_{oy}^H \cdot x_{\max}}{\sum x_i^2} - \frac{M_{ox}^H \cdot y_{\max}}{\sum y_i^2} = 366,1 + 44,3 - 24,5 = 385,9 \text{ кН};$$

$$N_5^H = \frac{N_0^H + G_{p,гp}^H}{n} - \frac{M_{ox}^H \cdot y_{\max}}{\sum y_i^2} = 366,1 - 24,5 = 341,6 \text{ кН};$$

$$N_6^H = N_{\min}^H = \frac{N_0^H + G_{p,гp}^H}{n} - \frac{M_{oy}^H \cdot x_{\max}}{\sum x_i^2} - \frac{M_{ox}^H \cdot y_{\max}}{\sum y_i^2} = 366,1 - 44,3 - 24,5 = 297,3 \text{ кН}.$$

2 Расчет осадки свайного фундамента.

Расчет осадки свайного куста ведется по [2, формула (7.42)]:

$$s_i = s(N_i) + \sum_{j \neq i} \delta_{ij} \frac{N_j}{G_1 \cdot l},$$

где $s(N_i)$ – осадка одиночной (i -й) сваи от нормативной нагрузки, действующей на нее, определяемая по [2, формула (7.34)];

j – количество всех свай, входящих в куст (за исключением i -й сваи);

δ_{ij} – коэффициент, определяемый по [2, формула (7.39)];

N_j – нормативная нагрузка на j -ю сваю (учитываются все сваи, кроме i -й, для которой определяется осадка);

G_1 – модуль сдвига грунта, принимаемый осредненным для всех грунтов в пределах длины сваи [2, п. 7.4.3] (рис. 16):

$$G_1 = 0,4 \cdot E_o = 0,4 \left(\frac{h_1 \cdot E_{1cp} + h_2 \cdot E_{2cp}}{h_1 + h_2} \right) = 0,4 \left(\frac{4,33 \cdot 10,5 + 1,27 \cdot 29}{4,33 + 1,27} \right) = \\ = 0,4 \cdot 14,7 = 5,88 \text{ МПа}$$

(здесь E_o – модуль деформаций грунта, принимаемый осредненным для всех грунтов в пределах длины сваи; E_{1cp} , E_{2cp} – модули деформации грунтов, прорезаемых свай; h_1 , h_2 – толщина слоев грунта, прорезаемых свай);

l – длина части сваи, имеющей контакт с грунтом ($l = 5,6$ м; см. рис. 16).

Для расчета осадки одиночной сваи $s(N_i)$ (первое слагаемое в [2, формула (7.42)]) необходимо предварительно определить значения следующих характеристик:

ν_1 – коэффициент Пуассона грунта, принимаемый осредненным для всех грунтов в пределах длины сваи (см. рис. 16):

$$\nu_1 = \frac{h_1 \cdot \nu_{1cp} + h_2 \cdot \nu_{2cp}}{h_1 + h_2} = \frac{4,33 \cdot 0,40 + 1,27 \cdot 0,32}{4,33 + 1,27} = 0,38,$$

где ν_{1cp} , ν_{2cp} – коэффициенты Пуассона грунтов, прорезаемых свай ($\nu_{1cp} = 0,40$; $\nu_{2cp} = 0,32$ – по [4, табл. 5.10]);

G_2 и ν_2 – соответственно модуль сдвига и коэффициент Пуассона грунта, принимаемые осредненными для грунтов, располагающихся в пределах $0,5 \cdot l$ (на глубинах от l до $1,5 \cdot l$ от верха сваи):

$$G_2 = 0,4E_{2zp} = 0,4 \cdot 29 = 11,6 \text{ МПа},$$

$$\nu_2 = \nu_{2zp} = 0,32.$$

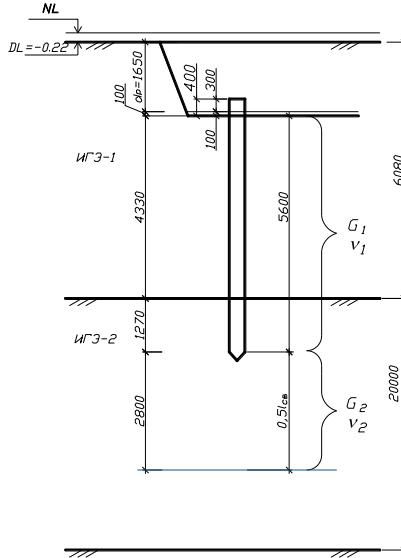


Рис. 16. Схема к определению модуля сдвига и коэффициента Пуассона грунта

Расчет осадки одиночной (i -й) сваи $s(N_i)$ (первое слагаемое в [2, формула (7.42)]) выполняется по [2, формула (7.34)]:

$$s = \beta \frac{N}{G_1 \cdot l},$$

где β – коэффициент, определяемый по [2, формула (7.35)];

N – нормативная вертикальная нагрузка на сваю, кН;

G_1, l – см. выше.

Коэффициент β вычисляется по формуле

$$\beta = \frac{\beta'}{\lambda_1} + 0,3 \frac{1 - \left(\beta' / \alpha' \right)}{\chi},$$

здесь $\beta' = 0,17 \ln(k_v \cdot \kappa)$ – коэффициент, соответствующий абсолютно жесткой свае ($E \cdot I = \infty$) [2, п. 7.4.2];

λ_1 – параметр, характеризующий увеличение осадки за счет сжатия ствола сваи (по [2, формула (7.36)]):

$$\lambda_1 = \frac{2,12 \cdot \chi^{3/4}}{1 + 2,12 \cdot \chi^{3/4}};$$

$\alpha' = 0,17 \ln\left(k_v l / d\right)$ – коэффициент для случая однородного

основания с характеристиками G_1 и ν_1 [2, п. 7.4.2];

$\chi = \frac{E_b \cdot A}{G_1 \cdot l^2}$ – относительная жесткость сваи [2, п. 7.4.2]

($E_b \cdot A$ – жесткость ствола сваи на сжатие, кН).

Определяем значения параметров, используемых для вычисления коэффициента β (и выполняем расчет коэффициента β):

k_v и k_{v1} – коэффициенты, определяемые по [2, формула (7.37)], соответственно при $\nu = (\nu_1 - \nu_2)/2$ и $\nu = \nu_1$ (k_v допускается принимать равным 2 по [2, п. 7.4.3]):

$$k_{v1} = 2,82 - 3,78 \cdot \nu_1 + 2,18 \cdot \nu_1^2 = 2,82 - 3,78 \cdot 0,38 + 2,18 \cdot 0,38^2 = 1,698;$$

κ – коэффициент, характеризующий геометрию и жесткость основания [2, п. 7.4.2]:

$$\kappa = \frac{G_1 \cdot l}{G_2 \cdot d} = \frac{5,88 \cdot 5,6}{11,6 \cdot 0,34} = 8,34;$$

d – расчетный диаметр для свай некруглого сечения (по [2, формула (7.9)]):

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,09}{3,14}} = 0,34 \text{ м};$$

$E_b = 30 \cdot 10^3$ МПа – модуль упругости бетона на сжатие ствола сваи, для бетона класса В25 принимается по [6, табл. 6.11];

$A = 0,09 \text{ м}^2$ – площадь поперечного сечения сваи;

$$\beta' = 0,17 \ln(k_v \cdot \kappa) = 0,17 \ln(2 \cdot 8,34) = 0,479;$$

$$\alpha' = 0,17 \ln\left(k_{v1} \cdot l \middle/ d\right) = 0,17 \ln\left(\frac{1,698 \cdot 5,6}{0,34}\right) = 0,566;$$

$$\chi = \frac{E_b \cdot A}{G_1 \cdot l^2} = \frac{30 \cdot 10^3 \cdot 0,09}{5,88 \cdot 5,6^2} = 14,64;$$

$$\lambda_1 = \frac{2,12 \cdot \chi^{3/4}}{1 + 2,12 \cdot \chi^{3/4}} = \frac{2,12 \cdot 14,64^{3/4}}{1 + 2,12 \cdot 14,64^{3/4}} = 0,941,$$

$$\beta = \frac{0,479}{0,941} + 0,3 \frac{1 - (0,479 / 0,566)}{14,64} = 0,512.$$

Определим осадку сваи № 1 (рис. 17):

$$s(N_1^n) = 0,512 \frac{434,9}{5,88 \cdot 10^3 \cdot 5,6} = 0,0068 \text{ м.}$$

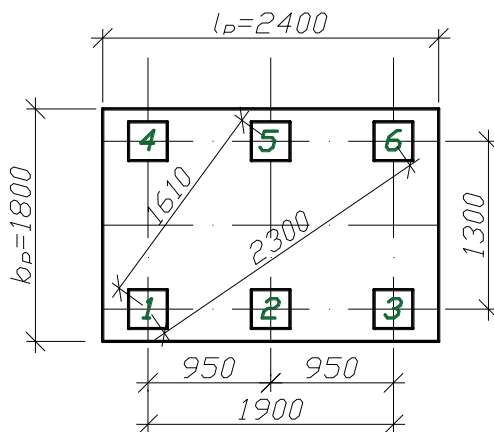


Рис. 17. Схема к определению расстояний a

Для определения дополнительной осадки сваи № 1 от пяти других необходимо найти коэффициенты δ_{ij} по [2, формула (7.41)]:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0,17 \ln \frac{k_v \cdot G_1 \cdot l}{2 \cdot G_2 \cdot a}, & \text{если } \frac{k_v \cdot G_1 \cdot l}{2 \cdot G_2 \cdot a} > 1; \\ 0, & \text{если } \frac{k_v \cdot G_1 \cdot l}{2 \cdot G_2 \cdot a} \leq 1, \end{cases}$$

где a – расстояние между осями свай (от оси i -й сваи, осадку которой необходимо определить, до оси j -й сваи, от которой определяется дополнительная осадка); расстояния показаны на рис. 17.

Таким образом,

$$\delta_{12} = 0,17 \ln \frac{2 \cdot 5,88 \cdot 5,6}{2 \cdot 11,6 \cdot 0,95} = 0,186, \text{ так как } \frac{2 \cdot 5,88 \cdot 5,6}{2 \cdot 11,6 \cdot 0,95} = 2,99 > 1;$$

$$\delta_{13} = 0,17 \ln \frac{2 \cdot 5,88 \cdot 5,6}{2 \cdot 11,6 \cdot 1,9} = 0,068, \text{ так как } \frac{2 \cdot 5,88 \cdot 5,6}{2 \cdot 11,6 \cdot 1,9} = 1,49 > 1;$$

$$\delta_{14} = 0,17 \ln \frac{2 \cdot 5,88 \cdot 5,6}{2 \cdot 11,6 \cdot 1,3} = 0,132, \text{ так как } \frac{2 \cdot 5,88 \cdot 5,6}{2 \cdot 11,6 \cdot 1,3} = 2,18 > 1;$$

$$\delta_{15} = 0,17 \ln \frac{2 \cdot 5,88 \cdot 5,6}{2 \cdot 11,6 \cdot 1,61} = 0,096, \text{ так как } \frac{2 \cdot 5,88 \cdot 5,6}{2 \cdot 11,6 \cdot 1,61} = 1,76 > 1;$$

$$\delta_{16} = 0,17 \ln \frac{2 \cdot 5,88 \cdot 5,6}{2 \cdot 11,6 \cdot 2,3} = 0,035, \text{ так как } \frac{2 \cdot 5,88 \cdot 5,6}{2 \cdot 11,6 \cdot 2,3} = 1,23 > 1.$$

Осадка сваи № 1 с учетом взаимного влияния других свай в кусте

$$\begin{aligned} s_1 &= s(N_1'') + \delta_{12} \frac{N_2''}{G_1 \cdot l} + \delta_{13} \frac{N_3''}{G_1 \cdot l} + \delta_{14} \frac{N_4''}{G_1 \cdot l} + \delta_{15} \frac{N_5''}{G_1 \cdot l} + \delta_{16} \frac{N_6''}{G_1 \cdot l} = \\ &= 0,0068 + 0,186 \frac{390,6}{5,88 \cdot 10^3 \cdot 5,6} + 0,068 \frac{346,3}{5,88 \cdot 10^3 \cdot 5,6} + 0,132 \frac{385,9}{5,88 \cdot 10^3 \cdot 5,6} + \\ &+ 0,096 \frac{341,6}{5,88 \cdot 10^3 \cdot 5,6} + 0,035 \frac{297,3}{5,88 \cdot 10^3 \cdot 5,6} = 0,0068 + 0,0022 + 0,0007 + \\ &+ 0,0015 + 0,0010 + 0,0003 = 0,0125 \text{ м.} \end{aligned}$$

Аналогично определены осадки других свай в кусте (№ 2–6). Результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения осадки свай № 2–6

№ сваи	a , м	δ_{ij}	S_{ad} , м	$s(N_i^H)$, м	s_{i2} , м
Осадка сваи № 2					
1	0,95	0,186	0,0025	0,0061	0,0140
3	0,95	0,186	0,0020		
4	1,61	0,096	0,0011		
5	1,30	0,132	0,0014		
6	1,61	0,096	0,0009		
Σ			0,0079		
Осадка сваи № 3					
1	1,90	0,068	0,0009	0,0054	0,0111
2	0,95	0,186	0,0022		
4	2,30	0,035	0,0004		
5	1,61	0,096	0,0010		
6	1,30	0,132	0,0012		
Σ			0,0057		
Осадка сваи № 4					
1	1,30	0,135	0,0017	0,0060	0,0117
2	1,61	0,096	0,0011		
3	2,30	0,035	0,0004		
5	0,95	0,186	0,0019		
6	1,90	0,068	0,0006		
Σ			0,0057		
Осадка сваи № 5					
1	1,61	0,096	0,0013	0,0053	0,0131
2	1,30	0,132	0,0016		
3	1,61	0,096	0,0010		
4	0,95	0,186	0,0022		
6	0,95	0,186	0,0017		
Σ			0,0078		
Осадка сваи № 6					
1	2,30	0,035	0,0005	0,0046	0,0103
2	1,61	0,096	0,0011		
3	1,30	0,132	0,0014		
4	1,90	0,068	0,0008		
5	0,95	0,186	0,0019		
Σ			0,0057		

Осадка свайного фундамента определяется как осредненная осадка всех свай в кусте:

$$s = \frac{s_1 + s_2 + s_3 + s_4 + s_5 + s_6}{n} =$$
$$= \frac{0,0125 + 0,0140 + 0,0111 + 0,0117 + 0,0131 + 0,0046}{6} = 0,0121 \text{ м.}$$

Проверка выполнения условия ($s \leq s_u$):

$$s = 1,21 \text{ см} \leq s_u = 10 \text{ см} - \text{условие выполняется.}$$

Значение s_u (предельная осадка основания фундамента) принято для здания с полным железобетонным каркасом по [2, прил. Г].

Список литературы

1. Проектирование оснований и фундаментов промышленного здания : задания и метод. указания по выполнению курсового проекта для студентов, обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» всех форм обучения / М-во образования и науки Рос. Федерации, Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин), Каф. инженерной геологии, оснований и фундаментов ; сост.: С. В. Линовский, Т. А. Якушкина. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2021. – 38 с. – URL: [http://www.sibstrin.ru/files/Linovskiy/Linovskiy%20Якушкина_ПрОсиФПр3д-МУ1\(2\).pdf?ysclid=lnv8d1z2w2993603520](http://www.sibstrin.ru/files/Linovskiy/Linovskiy%20Якушкина_ПрОсиФПр3д-МУ1(2).pdf?ysclid=lnv8d1z2w2993603520). – Текст : электронный.
2. СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты : актуализированная ред. СНиП 2.02.03-85 : введ. 2022-01-15. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/728474148> (дата обращения: 25.08.2023).
3. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация (с поправкой) : взамен ГОСТ 25100-2011 : введ. 01.01.2021. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 38 с.
4. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений : актуализированная ред. СНиП 2.02.01-83* : изм. 1–4 : введ. 2017-07-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206> (дата обращения: 25.08.2023).
5. ГОСТ 19804-2021. Сваи железобетонные заводского изготовления. Общие технические условия : введ. 2022-09-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200182176> (дата обращения: 25.08.2023).
6. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения : актуализированная ред. СНиП 52-01-2003 : изм. 1, 2 : введ. 2022-01-21. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-

- технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/728190897> (дата обращения: 25.08.2023).
7. Основания, фундаменты и подземные сооружения / М. И. Горбунов-Посадов, В. А. Ильичев, В. И. Крутов [и др.] ; под ред. Е. А. Сорочана, Ю. Г. Трофименкова. – Курган, 2007. – 480 с.
 8. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения : переиздание с изм. № 1 : введ. 2015-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 13 с.
 9. Проектирование и расчет фундаментов мелкого заложения на естественном основании (примеры расчета) : метод. указания для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 07.03.01 «Архитектура», 07.03.02 «Реконструкция и реставрация архитектурного наследия», 07.03.04 «Градостроительство» и 08.03.01 «Строительство» всех форм обучения / М-во образования и науки Рос. Федерации, Новосибир. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин), Каф. инженерной геологии, оснований и фундаментов ; сост.: С. В. Линовский, Т. А. Якушкина. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2023. – 36 с. – URL: <http://www.sibstrin.ru/>. – Текст : электронный.
 10. СП 131.13330.2020. Строительная климатология : актуализированная ред. СНиП 23-01-99* : изм. 1, 2 : введ. 2021-06-25. Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (дата обращения: 25.08.2023).

Составители

Станислав Викторович Линовский
Татьяна Аскольдовна Якушкина

ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И РАСЧЕТ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА
(пример расчета)

Методические указания
для студентов, обучающихся по направлениям подготовки
07.03.01 «Архитектура», 07.03.02 «Реконструкция и реставрация
архитектурного наследия», 07.03.04 «Градостроительство»
и 08.03.01 «Строительство» всех форм обучения

Редактор М.О. Мокшанова

Новосибирский государственный архитектурно-строительный
университет (Сибстрин)
630008, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113
