

РАВНОВЕСИЕ ОСНОВАНИЯ ВИСЯЧЕЙ СВАИ

КубГАУ, кафедра «Основания и фундаменты»
Мариничев М. Б., д. т. н., профессор
Ляшенко П. А., к. т. н., профессор
 КубГТУ, кафедра «Кадастр и геоинженерия»
Денисенко В. В., к. т. н., доцент

Предложена схема расчета основания висячей сваи, опирающаяся на условия равенства сил упругого сопротивления грунтов основания и внешней нагрузки. При этом рассматривается взаимодействие сваи, грунтов основания и грунтов массива. Решение предполагает использование данных испытания сваи статической нагрузкой, увеличивающейся с постоянной скоростью, непрерывное измерение осадки, сопротивления грунта под нижним концом сваи и деформаций грунтов на боковой поверхности. Набор этих данных вместе с лобовым сопротивлением зонду при статическом зондировании позволяет рассчитать упругие и неупругие составляющие сопротивления основания сваи и обосновать выбор расчетного сопротивления, а также оценить поперечные размеры основания сваи, необходимые для расстановки свай в плане фундамента.

ВВЕДЕНИЕ

Распределение усилий в грунтах вокруг висячей сваи определяет сопротивление основания сваи внешней нагрузке и влияние его на соседние сваи. Согласно общему мнению, вокруг сваи в грунте образуется напряженная зона, увеличивающаяся с глубиной [1, 2, 5, 12, 17, 19, 21, 23]. Мнение содержит в себе признание связи сопротивления грунтов с бытовыми напряжениями в них и подкрепляется измерениями и наблюдениями за осадками свай при нагружении, а также данными статического зондирования.

Равновесие основания висячей сваи рассматривалось многими авторами. Наиболее обоснованным и продуктивным представляется анализ его развития при перемещении сваи [3, 4, 5, 18, 19, 21, 22]. Центральным вопросом здесь является положение и перемещение мест разрушений грунтов. **Фронт разрушения** возникает в месте пересечения ствола с ненарушенным грунтом на **деформационной неоднородности**, где максимально концентрируются напряжения. Он перемещается вниз вдоль ствола сваи, по мере его осадки [3, 5, 6, 16].

УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ ОСНОВАНИЯ ВИСЯЧЕЙ СВАИ

При размещении висячей сваи на геологическом разрезе ее нижний конец обычно погружают в наиболее прочный опорный слой грунтов. Разделение вышележащей толщи на инженерно-геологические элементы произведем с учетом деформационных неоднородностей, выявленных при статическом зондировании. Будем считать, что локальные минимумы прочности в эпюре лобового сопротивления зонду маркируют положение слоев слабых грунтов, а интервалы между ними — консолидированных грунтов.

Представим основание висячей сваи в виде трех взаимодействующих тел: ствола сваи, основания сваи и грунтового массива [11, 15, 16]. Последние два разделены между собой границами областей предельного равновесия (ОПР). ОПР включает в себе грунт, находящийся или в состоянии упруго-пластической деформации (консолидированный), или пластической деформации (слабый). Обе части представляют собой твердые

тела, находящиеся в равновесии с окружающим сваю массивом (**рис. 1, а**).

Условие равенства вертикальных сил, действующих на основание сваи, имеет вид:

$$P=Q_z+R, \quad (1)$$

где P — вдавливающая сила; R — сопротивление грунта под нижним концом сваи; Q_z — вертикальная составляющая сопротивления массива грунтов.

Ствол сваи испытывает упругую реакцию грунтов после того, как неупругая составляющая релаксировала вследствие консолидации грунтов при достаточно медленном нагружении сваи (**рис. 1, б**):

$$P_e=R_e+C_z, \quad (2)$$

где P_e и R_e — упругие составляющие вдавливающей силы и сопротивления грунта под нижним концом сваи, соответственно; C_z — вертикальная составляющая упругого сопротивления консолидированных и слабых грунтов на боковой поверхности сваи.

Разделение сил на упругие и неупругие составляющие производится по их соответствию упругой и неупругой составляющим осадки сваи. Осадка изменяется скачкообразно при постоянно возрастающей вдавливающей силе. Разделение происходит на каждом скачке. Упругие части осадки объединим в группы, каждая из которых описывает деформацию j -го слоя грунта.

В слоях грунтов между локальными минимумами образуются области предельного равновесия [7], в которых реакция грунтов уравнивает действие сваи и на границах которых выполняются условия (**рис. 1, в**):

$$C_{z,j}=W_{z,j} \text{ и } C_{y,j}=W_{y,j}, \quad (3)$$

$$C_{z,1}=T_{e,1} \text{ и } C_{y,1}=\Gamma_{e,j}, \quad (4)$$

где $W_{z,j}$ и $W_{y,j}$ — составляющие по осям координат интегрального вектора реакции j -го слоя консолидированного грунта на внутреннем берегу огибающей поверхности ОПР; $T_{e,1}$ —

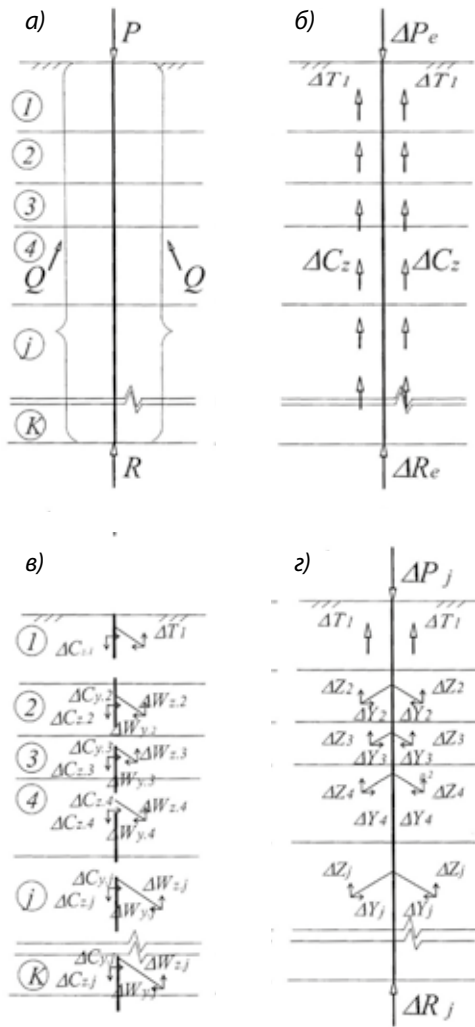


Рис. 1. Равновесие:

- а) основания сваи;
- б) ствола сваи;
- в) грунтов вокруг сваи (в правой части сечения);
- г) реакции массива грунтов

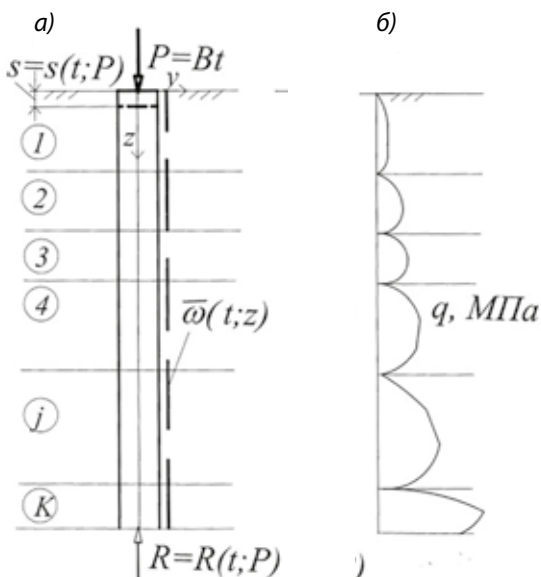


Рис. 2. Принципиальная схема испытания грунтов сваей (а). Эпюра лобового сопротивления грунтов зонду (б)

результатирующая упругого сопротивления (структурной прочности) слабых грунтов; $\Gamma_{e,j}$ — результирующая бытового давления.

Силы Z_j, Y_j и $T_{e,1}$ на внешнем берегу огибающих составляют упругую реакцию массива грунтов на действие сваи в j -м слое (рис. 1, г):

$$Q_{z,j} = Z_j + T_{e,1} \quad (5)$$

При вовлечении в сопротивление N слоев консолидированных грунтов получаем реакцию массива в формуле (1):

$$Q_z = \sum_{j=1}^N (Z_j + T_{e,1}) \quad (6)$$

Для осесимметричной схемы основания сваи:

$$Q_y = \sum_{j=1}^N Y_j = 0 \text{ и } \Gamma_y = \sum_{j=1}^N \Gamma_j = 0.$$

Две из перечисленных величин (P и R) измеряются в опыте, третья (Q_z) вычисляется из уравнения (1) как равнодействующая сил сопротивления упругой деформации массива грунтов. Но распределение величины Q_z по основанию сваи и изменение в ходе нагружения составляющих сил вычислить из уравнения (1) невозможно. А для применения формул (5) и (6) необходимы дополнительные измерения деформаций грунтов.

Для определения $C_z(z)$ необходимо прямое измерение деформации грунтов на боковой поверхности сваи с выделением упругой и неупругой частей. Оно должно быть синхронизировано с осадкой сваи и использовать частую расстановку датчиков деформации или технологию считывания распределенного сигнала DAS.

Значения и распределение $C_z(z)$ служат граничными условиями для расчетов ОПР. При этом рассчитываются $W_{z,j}$ и $W_{y,j}$ и размеры огибающих поверхностей ОПР. На внешних берегах огибающих рассчитываются компоненты по осям координат упругой реакции массива Z_j и Y_j , учитывая при переходе через огибающие только нормальные к ним напряжения.

Величины $T_{e,1}$ для слабых грунтов рассчитываются на боковой поверхности сваи, принимая соотношение $T_{e,1} = T_1$, где T_1 — предельное по прочности сопротивление сдвигу слабого грунта.

Построенные таким образом расчеты приводят к величинам (5) и (6), размерам ОПР, а также к величинам, рассчитанным по формулам:

$$R_N = \sum_{j=1}^N R_j \text{ и } C_{z,N} = \sum_{j=1}^N C_{z,j} \quad (7)$$

где N — число расчетных слоев или, учитывая движение фронта разрушения сверху вниз, число ОПР от начала нагружения сваи: $j=1 \dots N$.

ИСПЫТАНИЕ ГРУНТОВ

Испытание грунтов сваей с постоянно возрастающей нагрузкой (ПВН) дает возможность разделения осадки на упругую и неупругую составляющие. Оно наилучшим образом соответствует режиму нагружения проектной сваи в ходе строительства, если испытываемая свая является копией (по размерам и характеристикам поверхностей) проектных сваи. Скорость возрастания нагрузки должна обеспечивать завершение большей части консолидации грунтов за время испытания, что проверяется наблюдением за ползучестью основания при конечном значении вдавливающей силы [8, 9, 10].

Наблюдение за осадкой и вдавливающей силой ведется непрерывно в функции времени: $s=s(t;P)$ и $P=Bt$, соответственно, где t, s и P — время, осадка и вдавливающая сила, соответственно, B — скорость увеличения вдавливающей силы (рис. 2, а). Все величины регистрируются синхронно с шагом осадки $\Delta s = 0,005$ мм.

Осадка сваи изменяется скачкообразно, а скорость осадки, соответственно, — циклически, что позволяет разделить приращение осадки в каждом цикле на упругую и неупругую составляющие.

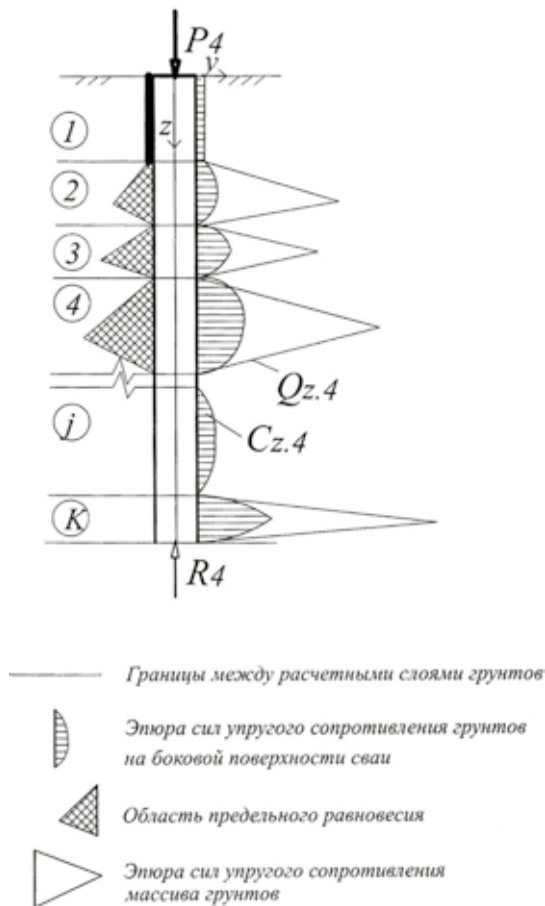


Рис. 3. Эпюры усилий и области предельного равновесия в грунтах основания висячей сваи для момента $j = 4$

Другие параметры опыта: сопротивление опорного грунта под нижним концом сваи $R=R(t;P)$ и деформаций грунтов вблизи боковой поверхности сваи $\varpi(t;z)$ — также регистрируются синхронно с осадкой сваи, что позволяет выделить их упругую и неупругую составляющие.

Статическое зондирование показывает общий рост с глубиной лобового сопротивления зонду $q(z)$. Оно обычно представлено крайне неравномерной эпюрой, которая отражает различие прочности консолидированных и слабых грунтов (рис. 2, б). Локальные минимумы прочности в эпюре сопротивления

зонду отражают низкую прочность слоев и линз слабых грунтов, которые являются деформационными неоднородностями в основании сваи.

На **деформационных неоднородностях фронт разрушения** производит наиболее крупные перемещения грунтов вблизи боковой поверхности, имеющие характер скачков от постепенного сжатия слоя слабого грунта к мгновенному образованию поверхностной скольжения в консолидированном грунте. Скачки перемещений грунтов порождают скачки осадки сваи [16].

Таким образом, испытание методом ПВН вместе со статическим зондированием образует комплекс «инструментированного» [23] испытания грунтов сваей, объединяющий определение силовых и геометрических параметров основания. Действительно, определение значений P_e и R_e , соответствующих упругой части осадки, позволяет рассчитать C_z по уравнению (2) для каждого j -го момента нагружения. Для того чтобы получить распределение $C_z(t;z)$, устанавливается с помощью данных измерений $\varpi(t;z)$ однозначное соответствие скачков осадки сваи с локальными минимумами $q(z)$. Тогда значения $C_{z,j}(z_j)$ вместе с бытовыми усилиями $\Gamma_{e,j}$ служат граничными условиями для расчета ОПР грунтов j -го слоя, что позволяет рассчитать величины $W_{z,j}$ и $W_{y,j}$, а также размеры огибающих линий и силы Z_j, Y_j и $T_{e,1}$ на их внешнем берегу. Силы сопротивления упругой деформации грунтов на периферии ОПР рассчитывают по формуле (5). Тем самым решается задача равновесия основания висячей сваи и определяются усилия в нем (рис. 3).

ОЦЕНКА РАВНОВЕСИЯ ОСНОВАНИЯ ВИСЯЧЕЙ СВАИ

Расчеты усилий в грунтах основания висячей сваи длиной 25 м и диаметром 0,6 м, произведенные по формулам (6) и (7), позволили проследить их изменение при увеличении вдавливающей силы. Сопротивление грунта под нижним концом сваи R проходит через максимум, после которого оно быстро уменьшается, при этом реакция массива грунтов Q_z быстро увеличивается (рис. 4). Упругое сопротивление грунтов на боковой поверхности сваи C_z медленно увеличивается во всем диапазоне значений P .

Такой тренд усилий объясняется тем, что:

1. Сопротивление грунта под нижним концом сваи исчерпывается (вблизи максимума) при критическом разрушении грунта опорного слоя.
2. Вследствие этого, увеличивается доля усилий, передаваемых областями предельного равновесия грунтов в массив вокруг ствола сваи (особенно быстро вблизи максимума сопротивления грунта опорного слоя).
3. Сопротивление грунтов упругим деформациям на боковой поверхности сваи ограничено, во-первых, передачей усилий



Рис. 4. Графики изменения усилий в грунтах основания висячей сваи

внутри областей предельного равновесия (деформациями внутреннего трения) и, во-вторых, малыми значениями структурной прочности, создающей трение слабых грунтов по бетону сваи.

Очевидно, что расчетное сопротивление висячей сваи должно быть меньше значения вдавливающей силы, при котором сопротивление грунта опорного слоя достигает максимума. Соответствующие ему размеры ОНР определяют размеры основания сваи, внутри которых грунты находятся в упруго-пластическом состоянии, а следовательно, и число свай в фундаменте [7, 12, 13, 14, 16, 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное исследование, включающее испытание грунтов сваей методом ПВН, измерение сопротивления грунта опорного слоя, измерение деформаций грунтов на боковой поверхности и измерение сопротивления зонду, дает необходимый и достаточный набор параметров основания сваи для расчета его сопротивления внешней нагрузке и обоснования выбора **расчетного сопротивления**. При этом расчеты областей предельного состояния позволяют оценить **поперечные размеры основания** сваи, знание которых необходимо для расстановки свай в плане фундамента. ■

Список источников

1. Бартоломей А. А., Омельчак И. М., Юшков В. С. Прогноз осадок свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1994. 384 с.
2. Гольдштейн М. Н., Царьков А. А., Черкасов И. И. Механика грунтов, основания и фундаменты. М.: Транспорт, 1981. 320 с.
3. Готман А. Л. Расчет одиночных свай и свайных фундаментов (доклад) // Герсевановские чтения 15 марта 2017 г., Новосибирск: Товарищество сибирских геотехников, 2017.
4. Григорян А. А. Расчет оснований свайных фундаментов в свете решения задач механики грунтов // Труды Международной НТК по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству. Пермь. 2004. Т. 1. С. 200–205.
5. Далматов Б. И., Лапшин Ф. К., Россихин Ю. В. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов. Л.: Стройиздат, 1975. 240 с.
6. Ляшенко П. А., Денисенко В. В., Мариничев М. Б. Исследования работы оснований буронабивных свай // Строительство: новые технологии — новое оборудование. 2019. № 7. С. 18–23.
7. Ляшенко П. А., Денисенко В. В., Мариничев М. Б. Описание работы буронабивных свай в группе с использованием расширенной схемы сопротивления грунтового основания // Строительство и реконструкция. 2021. № 2 (94). С. 46–55.
8. Ляшенко П. А., Денисенко В. В., Мариничев М. Б. Совершенствование технологии испытания буронабивной висячей сваи // Строительство: новые технологии — новое оборудование. 2020. № 6. С. 12–20.
9. Ляшенко П. А., Денисенко В. В., Мариничев М. Б. Схема работы под нагрузкой буронабивных свай в глинистых грунтах // Строительство: новые технологии — новое оборудование. 2019. № 8. С. 34–40.
10. Ляшенко П. А., Денисенко В. В., Мариничев М. Б. Учет взаимодействия бетонных свай в основании фундамента // Строительство: новые технологии — новое оборудование. 2020. № 6. С. 27–33.
11. Ляшенко П. А., Денисенко В. В., Мариничев М. Б. Сопротивление основания буронабивной висячей сваи внешней нагрузке // Строительство и реконструкция. 2020. № 5 (91). С. 22–31.
12. Мангушев Р. А. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии // Р. А. Мангушев, А. Л. Готман, В. В. Знаменский, А. Б. Пономарев. М.: Изд-во АСВ, 2015, 320 с.
13. Мариничев М. Б. Особенности учета инженерно-геологического строения оснований пойменных территорий в сейсмических районах при выборе технических решений фундаментов высотных зданий // Вестник ПНИПУ. 2018. № 1 (9). С. 103–113.
14. Мариничев М. Б., Ляшенко П. А., Денисенко В. В. О взаимодействии грунта с поверхностью бетонной сваи // Сб. науч. тр. по материалам IV международной научно-практической конференции. Орел, 2020. С. 232–239.
15. Мариничев М. Б., Ляшенко П. А., Денисенко В. В. Работа буронабивных свай под нагрузкой в глинистых грунтах // Сб. науч. тр. по материалам IV международной научно-практической конференции. Орел, 2020. С. 240–246.
16. Мариничев М. Б. Исследование работы буровых висячих свай в составе фундаментов многоэтажных и высотных зданий. КубГАУ: Просвещение-Юг, 2022. 155 с.
17. Мариничев М. Б., Ляшенко П. А., Денисенко В. В., Ткачев И. Г. Расчет и конструирование свайных фундаментов высотных зданий в сложных грунтовых условиях // Фундаменты. 2021. № 1. С. 58–62.
18. Метс М., Мусатова Е. Определение несущей способности свай с помощью статических и динамических испытаний // Сб. мат-лов Междунар. НТК «Геотехника Беларуси: наука и практика». Минск, 23–25.10.2013. С. 178–194.
19. Шадуц К. Ш., Мариничев М. Б., Демченко В. А. Патент РФ на изобретение № 2303106. Способ возведения плитного фундамента повышенной жесткости // Бюлл. изобр., 2007. № 20.
20. Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З., Сидоров В. В. Взаимодействие длинных свай с окружающим грунтом с учетом нелинейных и реологических свойств в условиях высотного строительства (доклад) // 100+ Forum Russia 2019 — международный форум и выставка высотного и уникального строительства. Екатеринбург, 29.10–1.11.2019.
21. Тер-Мартirosян А. З. Взаимодействие фундаментов зданий и сооружений с водонасыщенным основанием при учете нелинейных и реологических свойств грунтов. Автореф. дисс. ... д. т. н. / Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ. Москва, 2016.
22. Трофименков Ю. Г. Совершенствование методов определения несущей способности свай // Ю. Г. Трофименков, Б. В. Бахолдин, В. Б. Швеи, Л. Г. Мариупольский, А. И. Работников, А. И. Алексеев, О. И. Лобов. Тр. к VIII Междунар. конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. М.: Стройиздат, 1973. С. 150–161.
23. Харитонов А. Ю. Статические испытания «инструментированных свай» // Фундаменты. 2021. № 1. С. 66–67.