

УДК 691.31:699.86

**ОЦЕНКА ДЕФОРМАТИВНОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ ОСИ СВАЙ  
ИМЕЮЩИХ ЖЕСТКОЕ СОПРЯЖЕНИЕ С РОСТВЕРКОМ ПРИ  
ДЕЙСТВИИ НА НИХ БОКОВОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ**

***Викторов Валерий Васильевич,***

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г.Пенза,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции».*

***Викторова Ольга Леонидовна,***

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г.Пенза,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и  
архитектура»*

***Гришин Анатолий Евгеньевич,***

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г.Пенза,*

*студент.*

**Аннотация**

Представлена методика по определению внутренних усилий, горизонтальных перемещений и поворота оси в сваях, воспринимающих горизонтальную боковую нагрузку и имеющих жесткое сопряжение с ростверком. Методика, представленная авторами, позволяет упростить расчет свайных фундаментов с жестким сопряжением с ростверком, необходимый при проектировании зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** жесткое сопряжение, расчет свай; деформативность свай; действие боковой нагрузки; внутренние усилия в сваях.

**ASSESSMENT OF THE LONGITUDINAL DEFORMABILITY OF  
PILES WITH A STIFF CONNECTION TO THE FOUNDATION UNDER  
LATERAL HORIZONTAL LOADS**

***Viktorov Valery Vasilyevich,***

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*Candidate of Sciences, Associate Professor of the department "Building structures".*

***Viktorova Olga Leonidovna,***

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*Candidate of Sciences, Associate Professor of the department "Urban development and architecture".*

***Grishin Anatoly Evgenievich,***

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*student.*

## **Abstract**

The paper presents a method for determining internal forces, horizontal movements, and axis rotation in piles that receive horizontal lateral load and have a rigid connection with the pile cap. The method presented by the authors simplifies the calculation of pile foundations with a rigid connection to the pile cap, which is necessary for the design of buildings and structures.

**Keywords:** rigid coupling, pile calculation; pile deformability; lateral load effect; internal forces in piles.

В настоящее время свайные фундаменты широко применяются при возведении самых разнообразных зданий. Основной конструкцией свайных фундаментов являются сваи. В техническом плане сваи могут иметь разнообразное конструктивное или технологическое решение, однако основным назначением свай является передача нагрузки от вышестоящего здания на грунт основания. Как правило, сваи воспринимают все нагрузки от вышележащих конструкций через промежуточную конструкцию, называемую "ростверк", которая представляет собой толстую балку или плиту.

В зависимости от принятого в проекте конструктивного решения здания, от действующих нагрузок и грунтовых условий, сопряжение сваи с ростверком может выполняться по жесткой или шарнирной схемам.

При шарнирном сопряжении сваи с конструкцией ростверка на сваю передается сосредоточенная нагрузка, которая может быть разложена на вертикальную составляющую  $N$  (продольная сила) и горизонтальную составляющую  $H$  (поперечная сила). при жестком сопряжении сваи и ростверка к указанным нагрузкам добавляется изгибающий момент  $M$ . Конструктивные решения свайных фундаментов должны соответствовать требованиям безопасности приведенным в [1] и [2].

В современных нормах проектирования свайных фундаментов [3] имеется методика расчета допустимой вертикальной нагрузки на сваю с точки зрения ее несущей способности и методика определения вертикального перемещения сваи в зависимости от действующей на сваю вертикальной нагрузки.

Методика расчета несущей способности и деформативности сваи при действии на сваю горизонтальной нагрузки практически отсутствует.

В соответствии с п 7.1.8 [3], свая должна рассчитываться как консольный стержень, жестко защемленный в грунте, расчет следует проводить как балку на упругом основании. При этом грунт, окружающий сваю, следует рассматривать как упругую линейно-деформируемую среду, характеризуемую коэффициентом постели  $C_z$  (кН/м<sup>3</sup>). Длина расчетного консольного участка сваи зависит от коэффициента деформации  $\alpha_\varepsilon$  (1/м), определяемый по приложению "Б" [3].

Коэффициент постели  $C_z$  грунта на боковой поверхности зависит от коэффициента пропорциональности  $K$  (кН/м<sup>4</sup>) и прямо пропорционален глубине заложения рассматриваемой точки

Расчет свай на совместное действие вертикальной и горизонтальной сил и момента должен включать:

- проверку устойчивости грунта;

- расчет свай по деформациям, включающий проверку соблюдения условий допустимости расчетных значений горизонтального перемещения головы сваи  $u_p$  и угла поворота головы сваи  $\psi_p$ ;
- проверку сечений свай по предельным состояниям первой и второй групп.

Для проверки устойчивости грунта необходимо знать значения давления сваи на грунт (боковая нагрузка  $q$ ).

Для оценки деформаций свай необходимо иметь расчетные величины горизонтального перемещения головы сваи  $u_p = f$  и угла поворота головы сваи  $\psi_p = \varphi$ , чтобы сравнить их с допустимыми значениями  $[u_p]$  и  $[\psi_p]$  принимаемыми в соответствии с [4].

Проверка сечений свай по предельным состояниям первой и второй групп, по прочности, образованию и раскрытию трещин выполняется в соответствии с [5] на основе полученных значений изгибающего момента, продольной и поперечной сил.

В данной работе предлагается методика последовательного определения эпюры бокового давления грунта и соответствующей ей эпюре перемещений и поворота оси сваи для случая жесткого сопряжения оголовка сваи в ростверке. Случай шарнирного сопряжения оголовка сваи в ростверке рассмотрен в работе [6].

Рассмотрим вариант с горизонтальной силой, действующей на сваю в уровне сопряжения сваи с грунтом основания.

На стержень сваи будет действовать внешняя горизонтальная нагрузка  $H$  и сила отпора грунта  $q$ . На глубине  $z$  эта сила равна произведению коэффициента постели  $C(z)$  и горизонтального перемещения сваи  $f$  в рассматриваемой точке  $q(z) = f(z) \cdot C(z)$ ;

Из курса сопротивления материалов известно, что нагрузка, действующая на изгибаемый элемент с постоянной изгибной жесткостью по длине, и перемещения оси этого элемента связаны дифференциальной зависимостью.

Уравнение распределенной нагрузки по длине балки - есть четвертая производная от уравнения перемещений продольной оси балки.

Перемещения от внешней нагрузки вызывают реакцию грунта, препятствующую этому перемещению. При этом должно получиться равновесное условие, при котором уравнение изогнутой оси сваи будет соответствовать боковой реакции, а боковая реакция соответствовать перемещениям оси сваи.

Определение перемещений продольной оси сваи, внутренних усилий, сил отпора грунта производится методом итераций (последовательных приближений), с оценкой сходимости на каждом этапе.

Основные расчетные положения приняты по аналогии рассмотренной ранее в статье[6]:

- начало координат принимается в верхней точке сваи;
- направление оси  $x$  принимается вдоль оси сваи с направлением *вниз*, его значение равно глубине рассматриваемой точки  $z$  ( $x = z$ );
- горизонтальные перемещения оси сваи определяются в предположении упругой ее работы;
- линейный коэффициент упругости отпора грунта  $K_z$  вычисляется в соответствии с приложением "Б" [3] и принимается постоянным на всю расчетную глубину сваи;
- величина коэффициента постели линейно зависит от горизонтального перемещения сваи и глубины рассматриваемого сечения и вычисляется по формуле  $C(z) = K_z \cdot x$ ;

Рассматриваемая конструкция сваи имеет жесткое сопряжение с ростверком. Это сопряжение препятствует повороту головы сваи, в то же время не препятствует ее горизонтальному перемещению. Конструкция сваи с точки зрения теоретической механики является один раз статически неопределимой, расчет изгибающего момента в уровне головы сваи во всех итерациях выполнялся методом сил.

В первой итерации на сваю действует горизонтальная сила  $H$ .

Внешняя распределенная нагрузка отсутствует. Поперечная сила по длине сваи есть величина постоянная, равная боковой горизонтальной нагрузке.

$$Q(x)_1 = H;$$

$$Q(x) = Q(x)_1 = H;$$

Поперечная сила по длине сваи есть производная от изгибающего момента. Функция изменения изгибающего момента определяется решением дифференциального уравнения.

$$dM(x)_1 = Q(x)_1 \cdot dx.$$

$$M(x)_1 = \int Q(x)_1 \cdot dx = H \cdot x + C_2.$$

$$\text{При } x = 0 \quad M(x) = \frac{H \cdot l}{2} \quad \Rightarrow \quad C_2 = -\frac{H \cdot l}{2}.$$

$$M(x)_1 = H \cdot x - \frac{H \cdot l}{2} = \frac{H}{2} \cdot (2 \cdot x - l).$$

$$M(x) = M(x)_1$$

Изгибающий момент по длине сваи есть производная от угла поворота оси сваи. При постоянной изгибной жесткости сваи по ее длине функция изменения угла поворота оси определяется решением дифференциального уравнения.

$$d\varphi(x)_1 = \frac{1}{E \cdot I} M(x)_1 \cdot dx.$$

$$\varphi(x)_1 = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \int M(x)_1 \cdot dx = \frac{H}{E \cdot I} \cdot x^2 / 2 + C_3.$$

$$\text{При } x = 0 \quad \varphi(x) = 0 \quad \Rightarrow \quad C_3 = 0.$$

$$\varphi(x)_1 = \frac{H}{2 \cdot E \cdot I} \cdot (x^2 - l \cdot x).$$

$$\varphi(x) = \varphi(x)_1$$

Угол поворота оси сваи по ее длине есть производная от горизонтального перемещения оси сваи. При постоянной изгибной жесткости сваи по ее длине функция горизонтального перемещения оси определяется решением дифференциального уравнения.

$$df(x)_1 = \varphi(x)_1 \cdot dx.$$

$$f(x)_1 = \int \varphi(x)_1 \cdot dx = \frac{H}{2 \cdot E \cdot I} \cdot (x^3 / 3 - l \cdot x^2 / 2) + C_4.$$

$$\text{При } x = l \quad f(x) = 0 \quad \Rightarrow \quad C_4 = \frac{H}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \frac{l^3}{6}$$

$$f(x)_1 = \frac{H}{2 \cdot E \cdot I} \cdot (x^3 / 3 - l \cdot x^2 / 2 + l^3 / 6) = \frac{H}{12 \cdot E \cdot I} \cdot (2 \cdot x^3 - 3 \cdot l \cdot x^2 + l^3).$$

$$f(x) = f(x)_1$$

Вторую итерацию проводим, используя уравнение изогнутой оси сваи, полученное в первой итерации.

Реакция упругого основания может быть вычислена по формуле

$$q(x) = f(x) \cdot C(z) = f(x) \cdot K_z \cdot x;$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от характеристик грунта и принимаемый по таблице В1 [3].

$$q(x)_2 = \frac{H \cdot K_z}{12 \cdot E \cdot I} \cdot (2 \cdot x^4 - 3 \cdot l \cdot x^3 + l^3 \cdot x);$$

Функция распределенной нагрузки по длине сваи есть производная от поперечной силы. Функция изменения поперечной силы может быть найдена решением дифференциального уравнения.

$$dQ(x)_2 = q(x)_2 \cdot dx.$$

$$Q(x)_2 = \int q(x)_2 \cdot dx = \frac{H \cdot K_z}{12 \cdot E \cdot I} \cdot (2 \cdot x^5 / 5 - 3 \cdot l \cdot x^4 / 4 + l^3 \cdot x^2 / 2) + C_1;$$

$$\text{При } x = 0 \quad Q(x) = 0 \quad \Rightarrow \quad C_1 = 0$$

$$Q(x)_2 = \frac{H \cdot K_z}{12 \cdot E \cdot I} \cdot (2 \cdot x^5 / 5 - 3 \cdot l \cdot x^4 / 4 + l^3 \cdot x^2 / 2) = \frac{H \cdot K_z}{240 \cdot E \cdot I} \cdot (8 \cdot x^5 - 15 \cdot l \cdot x^4 + 10 \cdot l^3 \cdot x).$$

Результирующее значение поперечной силы можно вычислить по формуле

$$Q(x) = Q(x)_1 - Q(x)_2.$$

Функция изменения изгибающего момента может быть найдена решением дифференциального уравнения.

$$dM(x)_2 = Q(x)_2 \cdot dx.$$

$$M(x)_2 = \int Q(x)_2 \cdot dx = \frac{H \cdot K_z}{240 \cdot E \cdot I} \cdot (8 \cdot x^6 / 6 - 15 \cdot l \cdot x^5 / 5 + 10 \cdot l^3 \cdot x^3 / 3) + C_2 =$$

$$= \frac{H \cdot K_z}{720 \cdot E \cdot I} \cdot (4 \cdot x^6 - 9 \cdot l^2 \cdot x^5 + 10 \cdot l^3 \cdot x^3) + C_2;$$

$$\text{При } x = 0 \quad M(x) = \frac{H \cdot K_z}{720 \cdot E \cdot I} \cdot 11 \cdot l^6 / 7 \quad \Rightarrow \quad C_2 = - \frac{H \cdot K_z}{720 \cdot E \cdot I} \cdot \frac{11 \cdot l^6}{7}.$$

$$M(x)_2 = \frac{H \cdot K_z}{720 \cdot E \cdot I} \cdot (4 \cdot x^6 - 9 \cdot l^2 \cdot x^5 + 10 \cdot l^3 \cdot x^3 - 11/7 \cdot l^6).$$

Результирующее значение изгибающего момента можно вычислить по формуле

$$M(x) = M(x)_1 - M(x)_2$$

При постоянной изгибной жесткости сваи по ее длине функция изменения угла поворота оси может быть найдена решением дифференциального уравнения.

$$d\varphi(x)_2 = M(x)_2 \cdot dx.$$

$$\varphi(x)_2 = \frac{1}{E \cdot I} \int M(x)_2 \cdot dx. =$$

$$\frac{H \cdot K_z}{720 \cdot (E \cdot I)^2} \cdot (4/7 \cdot x^7 - 9/6 \cdot l \cdot x^6 + 10/4 \cdot l^3 \cdot x^4 - 11/7 \cdot l^6 \cdot x) + C_3 =$$

$$= \frac{H \cdot K_z}{10080 \cdot (E \cdot I)^2} \cdot (8 \cdot x^7 - 21 \cdot l^2 \cdot x^6 + 35 \cdot l^3 \cdot x^4 - 22 \cdot l^6 \cdot x) + C_3.$$

$$\text{При } x = l \quad \varphi(x) = 0 \quad \Rightarrow \quad C_3 = 0$$

$$\varphi(x)_2 = \frac{H \cdot K_z}{10080 \cdot (E \cdot I)^2} \cdot (8 \cdot x^7 - 21 \cdot l^2 \cdot x^6 + 35 \cdot l^3 \cdot x^4 - 22 \cdot l^6 \cdot x).$$

Результирующее значение угла поворота оси сваи можно вычислить по формуле

$$\varphi(x) = \varphi(x)_1 - \varphi(x)_2$$

Функция изменения горизонтального перемещения оси сваи может быть найдена решением дифференциального уравнения.

$$df(x)_2 = \varphi(x)_2 \cdot dx.$$

$$f(x)_2 = \int \varphi(x)_2 \cdot dx = \frac{H \cdot K_z}{10080 \cdot (E \cdot I)^2} \cdot (8/8 \cdot x^8 - 21/7 \cdot l \cdot x^7 + 35/5 \cdot l^3 \cdot x^5 - 22/2 \cdot l^6 \cdot x^2) +$$

$$C_4. =$$

$$= \frac{H \cdot K_z}{10080 \cdot (E \cdot I)^2} \cdot (x^8 - 3 \cdot l^2 \cdot x^7 + 7 \cdot l^3 \cdot x^5 - 11 \cdot l^6 \cdot x^2) + C_4.$$

$$\text{При } x = l \quad f(x) = 0 \quad \Rightarrow \quad C_4 = \frac{H \cdot K_z}{10080 \cdot (E \cdot I)^2} \cdot 6 \cdot l^8.$$

$$f(x)_2 = \frac{H \cdot K_z}{10080 \cdot (E \cdot I)^2} \cdot (x^8 - 3 \cdot l^2 \cdot x^7 + 7 \cdot l^3 \cdot x^5 - 11 \cdot l^6 \cdot x^2 + 6 \cdot l^8).$$

Результирующее значение горизонтального перемещения оси сваи можно вычислить по формуле

$$f(x) = f(x)_1 - f(x)_2$$

Длина сваи  $l$ , учитываемая в расчете может быть определена из уравнения равновесия на всех сил на горизонтальную ось.

$$H = \int_0^l \frac{H \cdot K_z}{12 \cdot E \cdot I} \cdot (2 \cdot x^4 - 3 \cdot l \cdot x^3 + l^3 \cdot x) \cdot dx;$$

$$H = \frac{H \cdot K_z}{12 \cdot E \cdot I} \cdot (2/5 \cdot x^5 - 3/4 \cdot l \cdot x^4 + 1/2 \cdot l^3 \cdot x^2) = \frac{H \cdot K_z}{240 \cdot E \cdot I} \cdot (8 \cdot x^5 - 15 \cdot l \cdot x^4 + 10 \cdot$$

$l^3 \cdot x^2)$ ;

$$\frac{H \cdot K_z}{240 \cdot E \cdot I} \cdot (8 \cdot x^5 - 15 \cdot l \cdot x^4 + 10 \cdot l^3 \cdot x^2) \Big|_{x=0}^{x=l}$$

$$H = \frac{H \cdot K_z \cdot l^5}{80 \cdot E \cdot I}$$

$$l = \sqrt[5]{\frac{80 \cdot E \cdot I}{K_z}} = 2,402 \cdot \sqrt[5]{\frac{E \cdot I}{K_z}} \approx \frac{2,4}{\sqrt[5]{\frac{K \cdot b}{\gamma_c E \cdot I}}}$$

Следует отметить, что полученная формула в целом соответствует формуле 7.1 [3] однако расчетная длина сваи, с защемлением в уровне ростверка на 20% больше расчетной длины сваи с шарнирным примыканием сваи к ростверку.

Третья итерация проводим, начиная, используя уравнение изогнутой оси сваи, полученное во второй итерации.

Реакция упругого основания может быть вычислена по формуле

$$q(x) = f(x) \cdot C(z); = f(x) \cdot K_z \cdot x;$$

$$q(x)_3 = \frac{H \cdot K_z^2}{10080 \cdot (E \cdot I)^2} \cdot (x^9 - 3 \cdot l^2 \cdot x^8 + 7 \cdot l^3 \cdot x^6 - 11 \cdot l^6 \cdot x^3 + 6 \cdot l^8 \cdot x).$$

Дальнейшие расчеты выполняются по аналогичному, приведенному выше алгоритму. Для анализа результатов были проведены итерации определения перемещений и усилий вплоть до пятой. Вычисления коэффициентов и постоянных дифференциальных уравнений проводились с помощью программы *Excel*. Проведение дальнейших итераций осложнилось действующим ограничением точности вычислений компьютерной программы. В связи с длинными формулами и большими значениями постоянных интегрирования эти выкладки в настоящей работе не приводятся.

Результаты вычислений представлены на графиках (см. рис. 1-5).

Вычисления приведены для сваи железобетонной сваи сечением  $300 \times 300$  мм. Свая забита в полутвердую ( $K = 18000 \text{ кН/м}^4$ ) глину и воспринимает горизонтальную нагрузку в 30 кН.

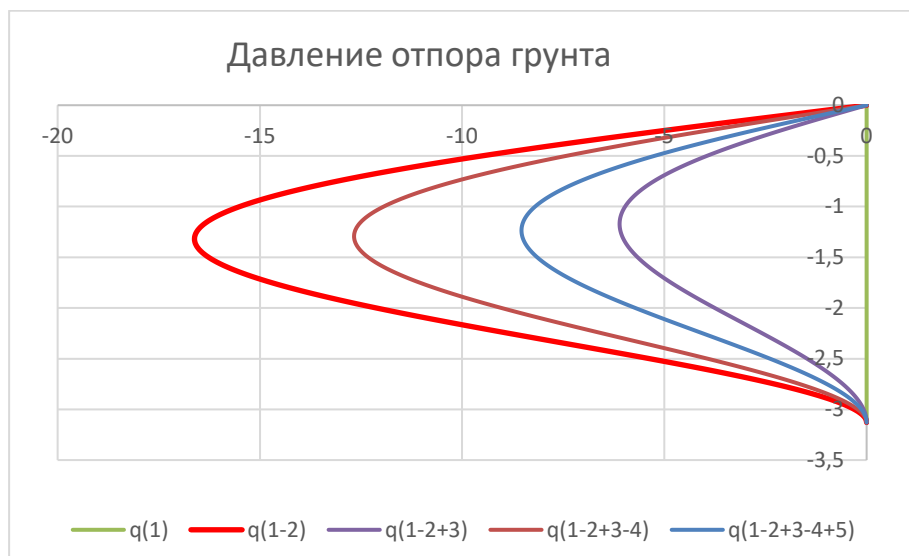


Рисунок 1 – Величина отпора грунта  $q$  (кН/м) по длине сваи в зависимости от схемы расчета

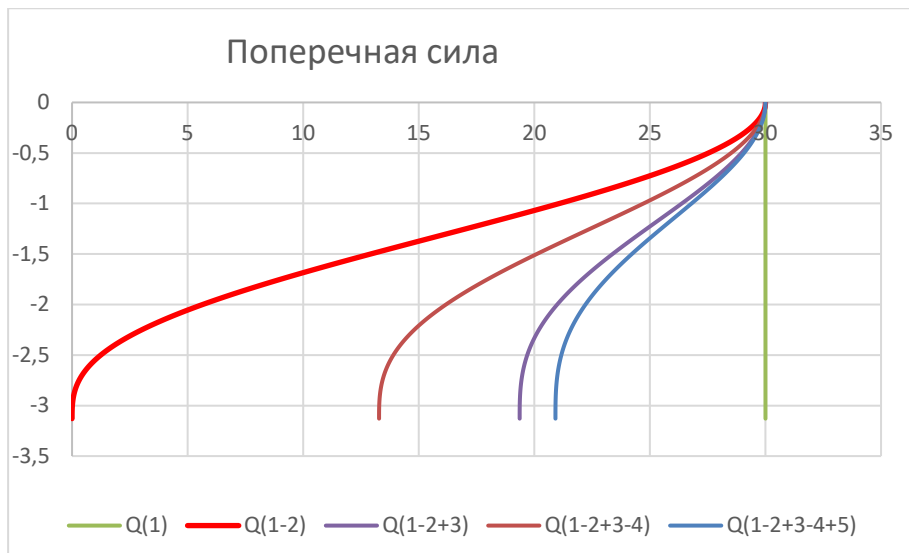


Рисунок 2 – Величина поперечной силы  $Q$  (кН) по длине сваи в зависимости от схемы расчета

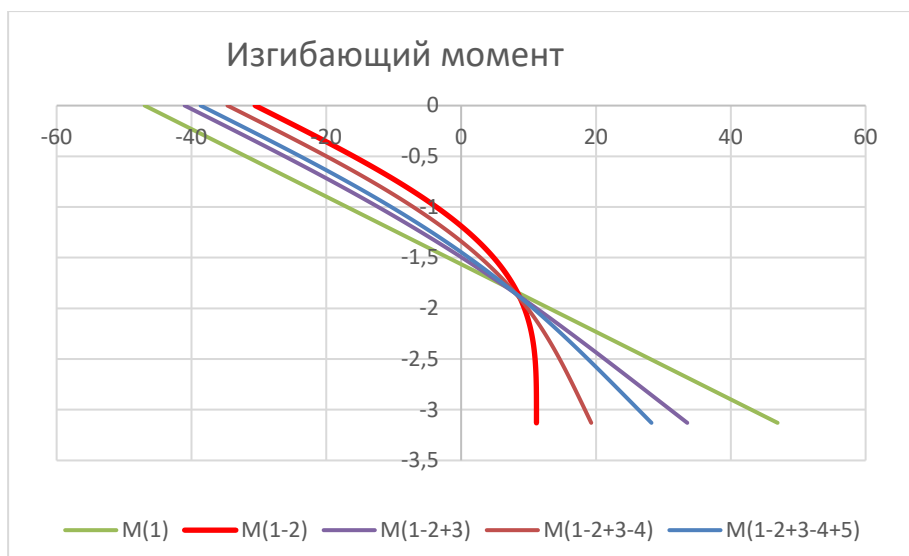


Рисунок 3 – Величина изгибающего момента  $M$  (кНм) по длине сваи в зависимости от схемы расчета

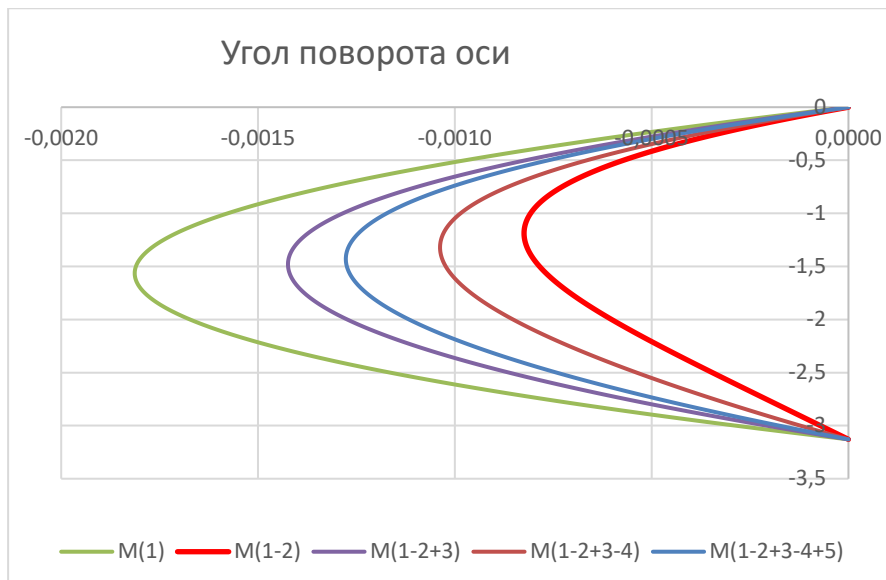


Рисунок 4 – Величина поворота оси сваи  $\varphi$  (рад) по ее длине в зависимости от схемы расчета

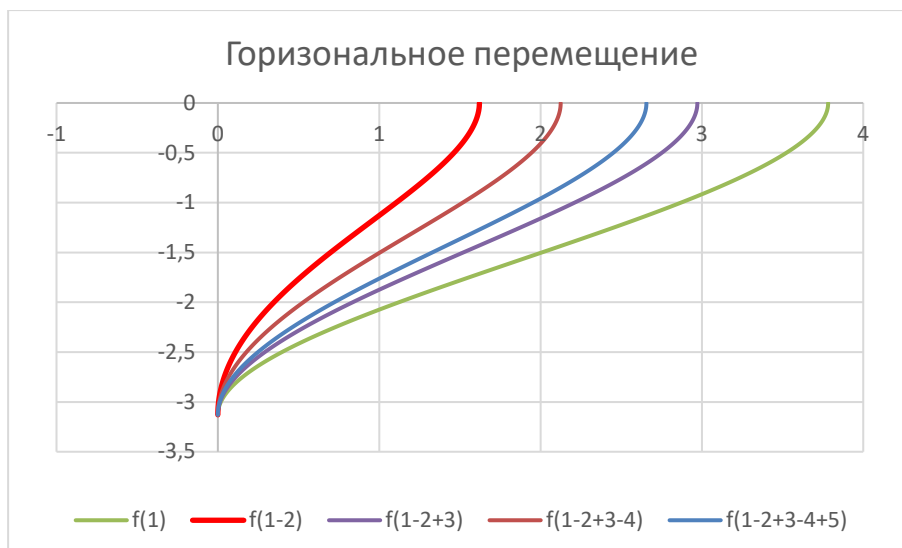


Рисунок 5 – Величина горизонтальных перемещений оси сваи  $f$  (мм) по ее длине в зависимости от схемы расчета

Процесс расчета с использованием полиномов имеет хорошую сходимость. Разность значений всех показателей ( $q$ ,  $Q$ ,  $M$ ,  $\varphi$ ,  $f$ ) четвертой и пятой итераций не превышает 1,5%.

Относительная разность значений всех показателей для различных итераций не зависит от величины коэффициента  $K$  и боковой нагрузки  $H$ .

Формулы для расчета показателей начиная с третьей итерации весьма сложны для инженерных расчетов и в данной статье не приведены.

Для инженерных расчетов предлагается использовать результаты расчета первых двух итераций. Нечетные итерации увеличивают значения боковой нагрузки, поперечной силы, изгибающего момента, угла поворота продольной оси и горизонтальной деформации сваи, четные итерации эти значения соответственно уменьшают. Точное значение приведенных итераций будет находиться в промежутке между четной и нечетной итерациями.

Для выполнения инженерных расчетов предлагается использовать полусумму значений первой и второй итераций.

Значение полусуммы первой и второй итераций при расчете бокового давления грунта в точке максимального давления составляет 97,4% от результатов расчета по 5 итерации.

Максимальное значение поперечной силы по длине сваи будет равно величине прилагаемой боковой нагрузки и будет находиться в точке приложения этой нагрузки.

Разность полусуммы первых двух итераций при расчете изгибающего момента в точке примыкания сваи к ростверку (максимального по абсолютной величине) составляет 100,3% от результатов расчета по 5 итерации.

Разность полусуммы первых двух итераций при расчете угла поворота оси сваи составляет 101,8% от результатов расчета по 5 итерации.

Разность полусуммы первых двух итераций при расчете горизонтального перемещения оси сваи составляет 101,7% от результатов расчета по 5 итерации.

Максимальное значение бокового давления грунта от первой итерации равно нулю. При умножении половины значения второй итерации на 1,03 получится коэффициент 0,52.

Максимального значения боковая нагрузка отпора грунта достигает на глубине  $x=0,420 \cdot l$ ,

где  $l$  – глубина защемления сваи в грунте.

Максимальное значение боковой нагрузки, необходимое для вычисления устойчивости грунта, окружающего сваю в этом случае составит

$$q(x)_2 = 0,52 \cdot \frac{H \cdot K_z}{12 \cdot E \cdot I} \cdot (2 \cdot 0,42^4 \cdot l^4 - 3 \cdot 0,42^3 \cdot l^4 + 0,42 \cdot l^4) = 0,0113 \cdot$$

$$\frac{H \cdot K_z \cdot l^4}{E \cdot I}.$$

Максимальное значение поперечной силы будет равно значению боковой нагрузки.

Максимальное отрицательное значение изгибающего момента будет находиться на глубине заземления сваи в ростверке при  $x = 0$  и будет равно

$$M_{\max} = M(x)_1 - 1/2 \cdot M(x)_2 = \frac{H}{2} \cdot (2 \cdot x - 1) - 1/2 \cdot \left( \frac{H \cdot K_z}{720 \cdot E \cdot I} \cdot (4 \cdot x^6 - 9 \cdot l^2 \cdot x^5 + 10 \cdot l^3 \cdot x^3 - 11/7 \cdot l^6) \right) = -\frac{H \cdot l}{2} \left( 1 - 0,0022 \cdot \frac{K_z \cdot l^5}{E \cdot I} \right).$$

Максимальное положительное значение изгибающего момента будет находиться на глубине заземления сваи в ростверке при  $x = l$  и будет равно

$$M_{\max} = M(x)_1 - 1/2 \cdot M(x)_2 = \frac{H}{2} \cdot (2 \cdot x - 1) - 1/2 \cdot \left( \frac{H \cdot K_z}{720 \cdot E \cdot I} \cdot (4 \cdot x^6 - 9 \cdot l^2 \cdot x^5 + 10 \cdot l^3 \cdot x^3 - 11/7 \cdot l^6) \right) = \frac{H \cdot l}{2} \left( 1 - 0,0048 \cdot \frac{K_z \cdot l^5}{E \cdot I} \right).$$

Максимальное значение угла поворота оси сваи будет находиться уровне приложения нагрузки при  $x = 0,5 \cdot l$  и будет равно

$$\varphi_{\max} = \varphi(x)_1 - 1/2 \cdot \varphi(x)_2 = \frac{H}{2 \cdot E \cdot I} \cdot (x^2 - l \cdot x) - 1/2 \cdot \frac{H \cdot K_z}{10080 \cdot (E \cdot I)^2} \cdot (8 \cdot x^7 - 21 \cdot l \cdot x^6 + 35 \cdot l^3 \cdot x^4 - 22 \cdot l^6 \cdot x) = -\frac{H \cdot l^2}{2 \cdot E \cdot I} \cdot (0,25 - 0,0009 \cdot \frac{K_z \cdot l^5}{E \cdot I}).$$

Максимальное значение горизонтального перемещения оси сваи будет находиться уровне приложения нагрузки при  $x = 0$  и будет равно

$$f_{\max} = f(x)_1 - 1/2 \cdot f(x)_2 = \frac{H}{12 \cdot E \cdot I} \cdot (2 \cdot x^3 - 3 \cdot l \cdot x^2 + l^3) - 1/2 \cdot \frac{H \cdot K_z}{10080 \cdot (E \cdot I)^2} \cdot (x^8 - 3 \cdot l^2 \cdot x^7 + 7 \cdot l^3 \cdot x^5 - 11 \cdot l^6 \cdot x^2 + 6 \cdot l^8) = \frac{H \cdot l^3}{12 \cdot E \cdot I} \cdot \left( 1 - \frac{K_z \cdot l^5}{70 \cdot (E \cdot I)} \right).$$

Таким образом, формулы приведенные имеют упрощенный вид пригодный для выполнения инженерных расчетов. Результаты вычисления по эти формулам имеют хорошую сходимость с результатами вычисления с использованием громоздких полиномов. Используя данные упрощенные формулы с достаточной точностью и надежностью можно определить максимальные значения внутренних усилий и перемещений оси сваи, погруженной в грунт и воспринимающей боковую нагрузку. Значения отпора грунта (горизонтальной нагрузки по боковой поверхности сваи могут быть использованы при расчете несущей способности грунта, окружающего сваю. Значения изгибающих моментов и поперечных сил могут быть использованы в конструктивных расчетах при определении требуемого армирования свай, Величины горизонтальных перемещений и углов поворота могут быть использованы в расчетах по второй группе предельных состояний.

#### **Библиографический список:**

1. Федеральный закон от 30 декабря 2009 года №384-ФЗ "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" М.: РГ Федеральный выпуск №5079, 2009.
2. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. М.: Стандартинформ, 2015.
3. СП 24.13330.2021 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. – М.: Минстрой РФ, 2011.
4. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. – М.: Минстрой РФ, 2016.
5. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Минстрой РФ, 2018.
6. Викторов В.В., Медведев Р.Н., Осетров А.А. Оценка прочности и деформативности свай при действии боковой горизонтальной нагрузки [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2023. №17.

Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL:  
[http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no17/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/17.07/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no17/stroitelnye-konstrukcii-zdaniya-i-sooruzheniya/17.07/at_download/file)