

УДК 624.154:624.04

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-195-201

РАСЧЕТ «ЖЕСТКИХ» ГОРИЗОНТАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ПИРАМИДАЛЬНЫХ СВАЙ

А. Л. Готман^{1,2}, С. А. Крутяев³

¹Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова, г. Москва, Россия,

²Российский университет транспорта, МИИТ, г. Москва, Россия,

³ООО «ПОДЗЕМПРОЕКТ», г. Москва, Россия

Аннотация. В зависимости от геометрических характеристик пирамидальной сваи, а также жесткости окружающего ее грунтового основания при действии на нее горизонтальной нагрузки может отличаться схема ее работы («жесткая» или «гибкая»). В статье представлены результаты численных экспериментов, на основании которых построена номограмма для определения схемы работы горизонтально нагруженной пирамидальной сваи. Также построена расчетная схема «жесткой» горизонтально нагруженной пирамидальной сваи и разработан метод ее расчета.

Ключевые слова: пирамидальная свая, горизонтальная нагрузка, коэффициент постели, несущая способность, грунтовое основание

CALCULATION OF «RIGID» HORIZONTALLY LOADED PYRAMIDAL PILES

A. L. Gotman^{1,2}, S. A. Krutyaev³

¹Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures, Moscow, Russia ²Russian University of Transport, Moscow, Russia

³PODZEMPROEKT LLC, Moscow, Russia

Annotation. Depending on the geometric characteristics of the pyramidal pile, as well as the stiffness of the surrounding soil, the pile's operating mode (rigid or flexible) may differ when subjected to a horizontal load. This article presents the results of numerical experiments, which were used to construct a nomogram for determining the operating mode of a horizontally loaded pyramidal pile. A design model for a "rigid" horizontally loaded pyramidal pile is also constructed, and a calculation method is developed.

Keywords: pyramidal pile, horizontal load, bed coefficient, bearing capacity, soil foundation

Введение

В СССР с начала 60-х годов прошлого столетия нашли широкое применение забивные пирамидальные сваи, чему способствовал тот факт, что их разработкой, проектированием и внедрением занимались несколько геотехнических школ [1, 2]. За счет наклонных боковых граней такие сваи имели высокую несущую способность, при этом погружались забивкой с помощью копра аналогично забивным призматическим сваям. Использовались они при этом преимущественно в качестве фундамента под самонесущие стены производственных зданий.

После начала 80-х годов пирамидальные сваи стали использоваться в качестве односвайных фундаментов каркасных зданий и сооружений [3]. Экономическая эффективность пирамидальных свай в сравнении с призматическими обуславливается отсутствием ростверка, не являющимся несущим элементом, но занимающий при этом, до 50 % от общего объема фундамента.

Свая при этом изготавливались монолитно на строительной площадке путем бетонирования предварительно выштампованной скважинообразователем скважины с погруженным в нее арматурным каркасом [4, 5].

Таким образом изготавливались пирамидальные сваи сечением до $1,2 \times 1,2$ м и длиной до 8,0 м под колонны размером до $0,6 \times 0,6$ м. При этом в каркасных зданиях помимо вертикальной на сваю действует горизонтальная и моментная нагрузки и за счет сосредоточения материала в оголовке сваи она эффективно им сопротивляется.

Помимо этого, была разработана технология устройства фундаментов под колонны каркасных зданий и сооружений, получивших название «фундаменты в вытрамбованных котлованах» [6, 7]. В рамках технологии скважина формировалась путем многократного сбрасывания и извлечения навешенной на мачту копра пирамидальной трамбовки с обязательным втрамбовыванием щебня в забой скважины. Скважины получались глубиной не более 3,0 м.

С целью обеспечения практического применения пирамидальных свай в качестве односвайных фундаментов выполнялись исследования и предложен ряд методов расчета таких свай на горизонтальную нагрузку, в которых свая рассматривается как абсолютно жесткая [8, 9], в однородном по глубине Винклеровском основании, а также как гибкая в упругом полупространстве [10].

Настоящая работа посвящена определению критериев, позволяющих классифицировать горизонтально нагруженную пирамидальную сваю как «жесткую» или как «гибкую».

В этой связи актуальной задачей является исследование особенностей работы таких свай на горизонтальную нагрузку и разработка метода их расчета на горизонтальную нагрузку.

Построение номограммы, расчетной схемы и вывод формул

Для определения влияния геометрических размеров сваи, а также жесткости окружающего ее массива с использованием линейно-упругой модели грунта был выполнен ряд численных экспериментов, в которых изменялись следующие параметры: размер головы сваи (от $0,8 \times 0,8$ до $1,2$ м с шагом 0,2 м), длина сваи (от 3,0 до 6,0 м с шагом 1,0 м), модуль деформации грунта $E_{гр}$ (от 10,0 до 25,0 м с шагом 5,0 МПа). Нижний размер поперечного сечения свай во всех расчет принят одинаковым и равен $0,3 \times 0,3$ м. Всего было выполнено 48 расчетов.

Горизонтальная нагрузка на сваю прикладывалась при помощи заданного горизонтального перемещения в уровне поверхности грунта, равного 15 мм. Во всех расчетах грунтовые условия принимались однородными и однослойными. Грунтовые воды не задавались. Модель грунта — линейно-упругая (Linear Elastic). Коэффициент Пуассона грунта принят 0,4. Удельный вес грунта 19 кН/м³.

Свая моделировалась объемным элементом (рис. 1). Модель материала сваи принята линейно-упругая. Свойства сваи приняты следующими: объемный вес $\gamma = 25$ кН/м³, модуль упругости $E = 27,5$ ГПа.

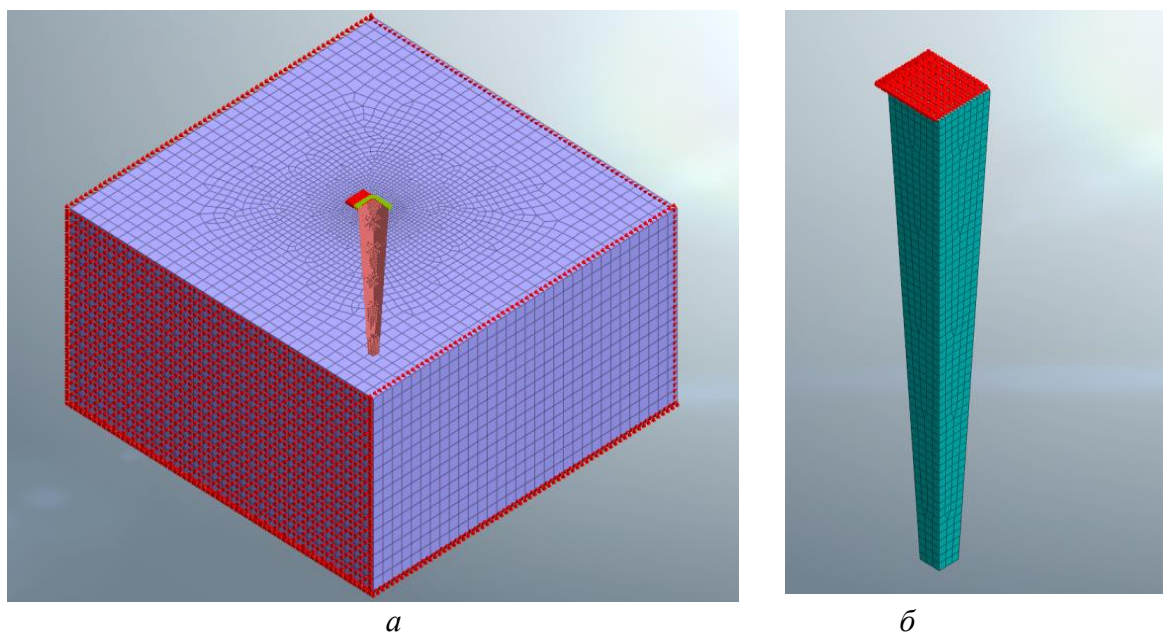


Рис. 1. Численная модель горизонтально нагруженной пирамидальной сваи:
а – общий вид схемы; *б* – общий вид сваи с приложенной нагрузкой

При анализе схемы работы сваи учитывались изменение двух параметров по глубине сваи – горизонтальное перемещение оси сваи и угол поворота оси сваи относительно вертикали (рис. 2).

Признаком работы сваи по жесткой схеме является прямолинейная форма ее оси, а также близкое к нулю изменение угла поворота сваи по глубине под действием нагрузки. Признаком работы сваи по гибкой схеме является криволинейная форма ее оси, наличием заделки в нижней части сваи, определяемой по малым значениям угла поворота. На основании этих критериев была выполнена классификация свай по схемам работы. По результатам расчетов из 48 схем — 10 свай «гибких», остальные 38 — «жесткие».

Для построения номограммы была решена классификационная задача, результатом которой является определение одной из двух категорий: свая, работающая по жесткой схеме и свая, работающая по гибкой схеме. Итоговая номограмма, а также пример ее использования, представлена на рис. 3.

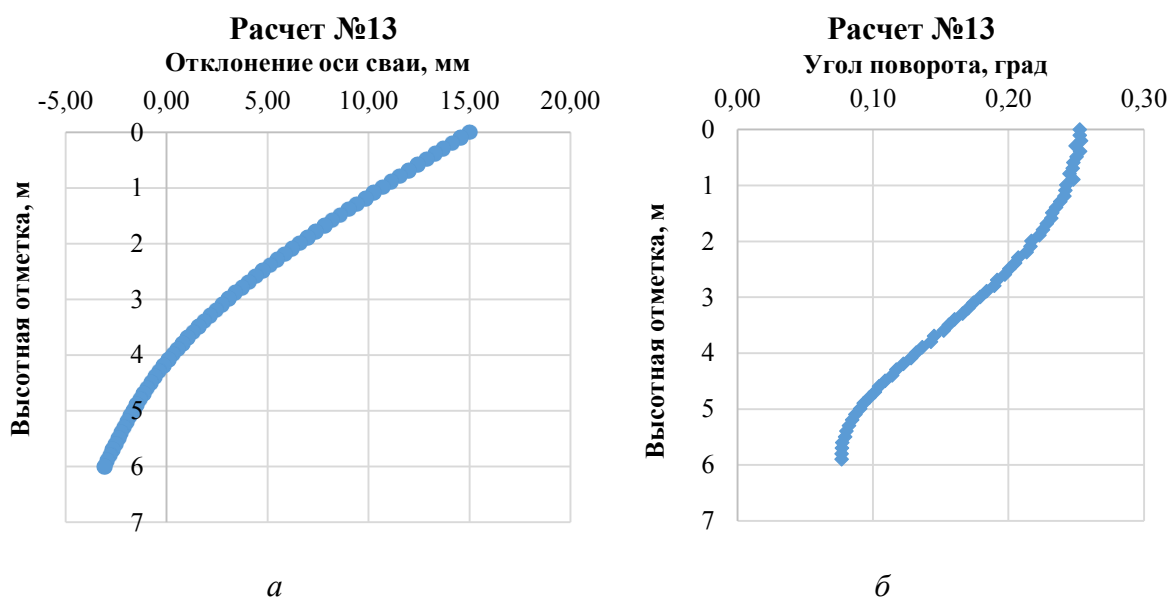


Рис. 2. Пример графика, построенного по результатам расчета свай:
a – перемещение оси свай; *б* – изменение угла поворота свай

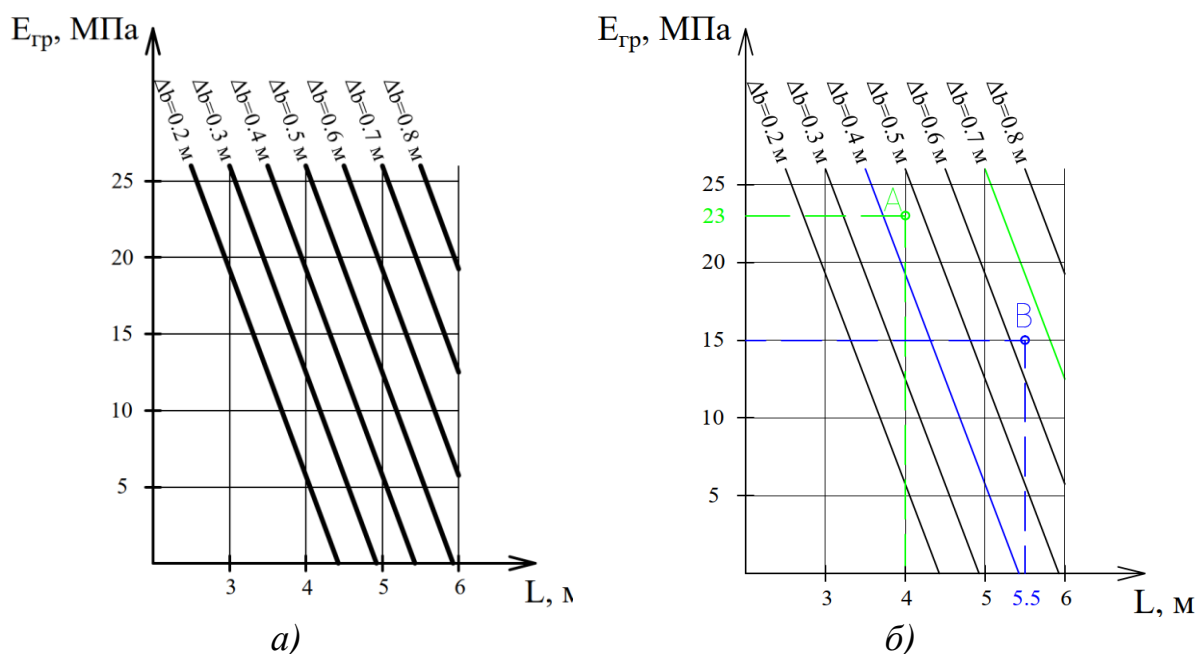


Рис. 3. Номограмма для определения схемы работы пирамидальной свай в зависимости от ее геометрических характеристик, а также жесткости основания:
a – оригинальная номограмма; *б* – пример использования

Для примера определим схему работы 2-х свай А и В со следующими характеристиками.

Свая А:

Длина $L = 4,0$ м.

Размеры верхнего сечения $b = 1,0 \times 1,0$ м.

Размеры нижнего сечения $0,3 \times 0,3$ м.

Модуль деформации грунта $E_{гр} = 23$ МПа.

При данных геометрических характеристиках сваи разница сторон ее верха и низа равна 0,7 м. Точка А на номограмме (выделена зеленым цветом, рис. 3) с координатами $X = L = 4,0$ м, $Y = E_{гр} = 23$ МПа располагается ниже изолинии $\Delta b = 0,7$, следовательно свая работает по «жесткой» схеме.

Свая В:

Длина $L = 5,5$ м.

Размеры верхнего сечения $b = 0,7 \times 0,7$ м.

Размеры нижнего сечения $0,3 \times 0,3$ м.

Модуль деформации грунта $E_{гр} = 15$ МПа.

При данных геометрических характеристиках сваи разница сторон ее верха и низа равна 0,4 м. Точка В на номограмме (выделена синим цветом, рис. 3) с координатами $X = L = 5,5$ м, $Y = E_{гр} = 15$ МПа располагается выше изолинии $\Delta b = 0,4$, следовательно свая работает по «гибкой» схеме.

Для построения расчетной схемы «жесткой» горизонтально нагруженной пирамидальной сваи примем следующие предпосылки.

Для построения расчетной схемы (рис. 4) примем следующие предпосылки.

1. Основание по глубине сваи однослойное с линейно изменяющимся по глубине коэффициентом постели C_z :

$$C_z = C_l \frac{z}{l}, \quad (1)$$

где C_l — коэффициент постели на глубине l ; z — текущая координата по глубине; l — длина сваи в грунте.

2. Размер поперечного сечения сваи b_z с глубиной изменяется по линейной зависимости

$$b_z = b_o - \Psi b_o z; \Psi = (b_o - b_n)/lb_o, \quad (2)$$

где b_o и b_n — размер стороны сечения соответственно верха и низа сваи, м.

3. Изгибная жесткость сваи принимается бесконечно большой, ввиду этого перемещение сваи по глубине U_z имеет вид

$$U_z = U_o - \varphi_o z, \quad (3)$$

где U_o — перемещение сваи в уровне поверхности грунта, м; φ_o — угол поворота сваи в уровне поверхности грунта, рад.

4. Горизонтальное давление грунта на сваю q_z^o на единицу длины сваи пропорционально ее перемещению $q_z^o = b_z C_z U_z$.

Коэффициент постели каждого слоя грунта C_l определяется из условия равенства осадок, определяемых по теории местных деформаций и упругого полупространства по формуле

$$C_l = \omega \frac{E_o A_r}{(1 - \mu_i^2) b_n}, \quad (5)$$

где ω — безразмерный коэффициент, зависящий от соотношения l/b ; E_0 — модуль общей деформации; μ_i — коэффициент Пуассона; A_r — безразмерный коэффициент, интегрально учитывающий уплотнение основания и анизотропию. Получен для «линейного» расчета путем обработки экспериментальных данных и выполнения «обратных» расчетов, в которых параметры перемещения ствола сваи являются заданной величиной (принимаются из результатов испытаний), а коэффициент A_r — искомой:

$$A_r = 18.5\Delta b - 1.4; \quad \Delta b = b_0 - b_n. \quad (6)$$

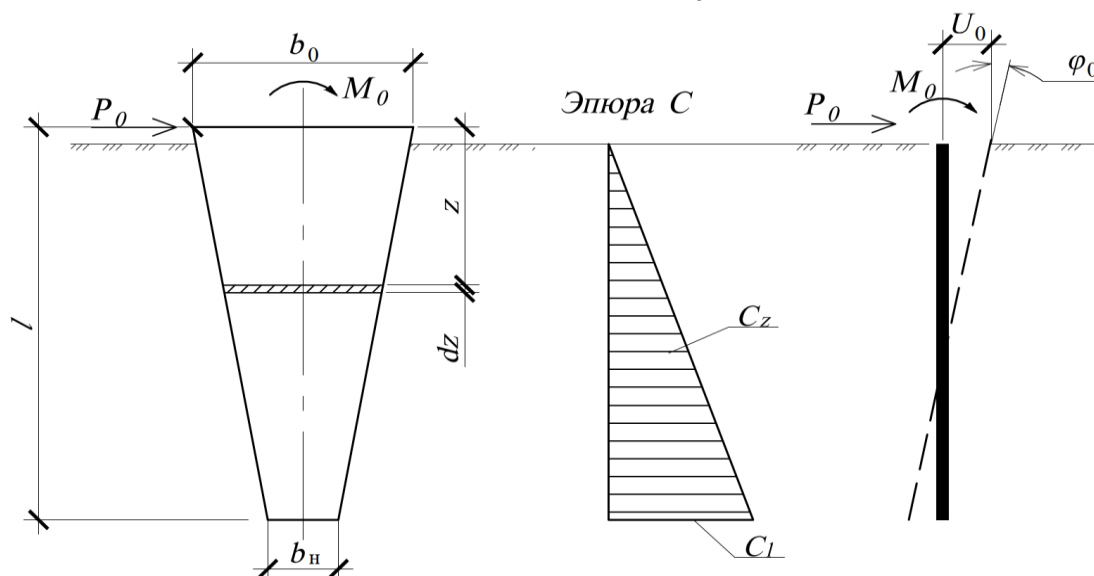


Рис. 4. Расчетная схема «жесткой» горизонтально нагруженной пирамидальной сваи

Записав условие равновесия между приложенными нагрузками M_0 и P_0 и сопротивлением грунтового основания, при граничных условиях $z = l$, $Q_l = 0$ и $M_l = 0$, получены формулы для определения горизонтального перемещения U_0 и угла поворота сваи φ_0 в уровне поверхности грунта:

$$\begin{aligned} U_0 &= M_0\alpha_1 + P_0\alpha_2; \\ \varphi_0 &= M_0\alpha_3 + P_0\alpha_4, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\alpha_1 \dots \alpha_4$ — единичные перемещения определяются по следующим формулам

$$\alpha_1 = \frac{X_2}{\zeta}; \quad \alpha_2 = \frac{lX_2 - \Phi_4}{\zeta}; \quad \alpha_3 = \frac{X_1}{\zeta}; \quad \alpha_4 = \frac{lX_1 - X_3}{\zeta}. \quad (8)$$

Значения $X_1 \dots X_4$ определяются по формулам

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{b_0 C_l}{12l} (6l^2 - 4\Psi l^3); \quad X_2 = \frac{b_0 C_l}{12l} (4l^3 - 3\Psi l^4); \\ X_3 &= \frac{b_0 C_l}{12l} (2l^3 - \Psi l^4); \quad X_4 = \frac{b_0 C_l}{12l} (l^4 - 0.6\Psi l^5). \end{aligned} \quad (9)$$

Значение ζ определяется по формуле

$$\zeta = X_2 X_3 - X_1 X_4. \quad (10)$$

Значения изгибающего момента M_z и поперечной силы Q_z в сечении z определяются по формулам

$$\begin{aligned} M_z &= M_0 + P_0 z + U_0 X_3 - \varphi_0 X_4; \\ Q_z &= P_0 + U_0 X_1 - \varphi_0 X_2. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь значения $X_1 \dots X_4$ определяются по формулам (9) с заменой l на z .

Выводы

На основании численных исследований установлены критерии, влияющие на схему работы горизонтальной нагруженной пирамидальной сваи, а также построена номограмма, позволяющая ее (схему работы) определить. Построена расчетная схема горизонтально нагруженной пирамидальной сваи как балки переменного по глубине сечения в винклеровском основании с линейно изменяющимся с глубиной коэффициентом постели, и разработан метод расчета таких свай, позволяющий определить перемещение головы сваи, угол ее поворота, а также усилия в свае.

Список источников

1. Бахолдин, Б. В. Исследование несущей способности пирамидальных свай / Б. В. Бахолдин, Н. Т. Игонькин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1978. – № 3. – С. 13-16.
2. Голубков, В. Н. Применение пирамидальных свай в строительстве по данным последних исследований / Г. В. Нолубков, А. И. Догадайло // Строительство и архитектура. – Новосибирск. – 1979. – Вып. 1. – С. 126-129.
3. Зиязов, Я. Ш. Опыт применения односвайных фундаментов под колонны / Я. Ш. Зиязов, А. Л. Готман // Энергетическое строительство. – 1978. – № 2.
4. Гильман, Я. Д. Опыт применения свай в выштампованном ложе / Я. Д. Гильман, В. С. Глухов, В. Д. Зотов // Межвузовский сб. РИСИ. – Ростов. – 1977. – С. 101-112.
5. Ермошкин, П. М. Способы проходки скважин под набивные сваи без выемки грунта / П. М. Ермошкин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1976. – № 4. – С. 14-16.
6. Багдасаров, Ю. А. Расчет осадок фундаментов в вытрамбованных котлованах на воздействие вертикальных и горизонтальных нагрузок / Ю. А. Багдасаров // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1984. – № 4. – С. 11-14.
7. Крутов, В. И. Фундаменты в вытрамбованных котлованах с уширенным основанием / В. И. Крутов, В. Л. Рафальзук, Ю. В. Власов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1978. – № 3. – С. 3-4.
8. Шахирев, В. Б. Расчет пирамидальных свай на горизонтальную нагрузку / В. Б. Шахирев // Вопросы строительства и архитектуры. – 1989. – № 17. – С. 87-90.
9. Нисенбойм, О. Б. Расчет усилий в фундаментах пирамидальной формы / О. Б. Нисенбойм // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1984. – С. 19-21.
10. Огранович, А. Б. Расчет гибкой пирамидальной сваи в упругом полупространстве на горизонтальную нагрузку / А. Б. Огранович // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1990. – № 5. – С. 110-112.

© Готман А. Л., Крутяев С. А., 2026