

DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.03

УДК 624.154: 624.04

РАСЧЕТ ПИРАМИДАЛЬНЫХ СВАЙ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ НАГРУЗКУ И ИЗГИБАЮЩИЙ МОМЕНТ С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

А.Л. Готман^{1,2,3}, С.А. Крутяев⁴

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

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

³Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

⁴Подземпроект, Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 22 июня 2022
Одобрена: 24 августа 2022
Принята к публикации:
15 сентября 2022

Ключевые слова:

пирамидальная свая, горизонтальная нагрузка, коэффициент постели, несущая способность, грунтовое основание, вертикальная нагрузка.

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментально-теоретических исследований особенностей работы набивной пирамидальной сваи на горизонтальную нагрузку. На опытной площадке, сложенной глинистыми грунтами, были изготовлены две опытные сваи и выполнены статические испытания на совместное действие вертикальной, горизонтальной и моментной нагрузок. По результатам испытаний получено, что наличие вертикальной нагрузки увеличивает сопротивление пирамидальной сваи горизонтальной нагрузке. На основании анализа результатов испытаний построена расчетная схема горизонтально нагруженной пирамидальной сваи в многослойном винклеровском основании с учетом трения на боковых гранях. Изгибная жесткость ствола сваи принята бесконечно жесткой. В соответствии с расчетной схемой разработан аналитический метод расчета пирамидальной сваи, нагруженной вертикальной и моментной нагрузками, учитывающий увеличение несущей способности при действии вертикальной нагрузки. По результатам расчета определяются горизонтальное перемещение головы сваи в уровне поверхности грунта, угол поворота сваи, а также изгибающие моменты и поперечная сила по длине сваи. Представлен пример расчета пирамидальной сваи на горизонтальную нагрузку с учетом и без учета трения на боковой поверхности сваи.

© ПНИПУ

© Готман Альфред Леонидович – доктор технических наук, профессор, email: gotmans@mail.ru

Крутяев Сергей Алексеевич – инженер, аспирант, email: sergkrut22@gmail.com

Alfred L. Gotman – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: gotmans@mail.ru

Sergey A. Krutyayev – Engineer, Postgraduate student email: sergkrut22@gmail.com

CALCULATION OF PYRAMID PILES FOR HORIZONTAL LOAD AND BENDING MOMENT ACCORDING TO THE ACTION OF VERTICAL LOAD

A.L. Gotman^{1,2}, S.A. Krutyayev³

¹Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

¹Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures, Moscow, Russian Federation

⁴Podzemproekt, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 22 June 2022
Approved: 24 August 2022
Accepted for publication:
15 September 2022

Keywords:

pyramidal pile, horizontal load, bed coefficient, bearing capacity, sub-grade, vertical load.

ABSTRACT

The results of experimental and theoretical studies of the features of the work of a stuffed pyramidal pile on a horizontal load are presented. On an experimental site composed of clay soils, 2 experimental piles were made and static tests were performed for the combined action of vertical, horizontal and moment loads. Based on the test results, it was found that the presence of a vertical load increases the resistance of a pyramidal pile to a horizontal load. Based on the analysis of the test results, a design scheme of a horizontally loaded pyramidal pile in a multilayer Winkler foundation was constructed, taking into account friction on the side faces. The bending rigidity of the pile shaft is assumed to be infinitely rigid. In accordance with the design scheme, an analytical method for calculating a pyramidal pile loaded with vertical and moment loads has been developed, taking into account the increase in bearing capacity under the action of a vertical load. Based on the results of the calculation, the horizontal displacement of the pile head in the level of the soil surface, the angle of rotation of the pile, as well as bending moments and transverse force along the length of the pile are determined. An example of calculating a pyramidal pile for a horizontal load with and without friction on the side surface of the pile is presented.

© PNRPU

Введение

В промышленном строительстве нашли применение односвайные фундаменты, обладающие значительными технико-экономическими преимуществами перед традиционными кустовыми свайными фундаментами и фундаментами на естественном и свайном основании.

В качестве односвайных фундаментов, наряду со сваями-оболочками и буронабивными сваями больших диаметров, стали применяться и набивные пирамидальные сваи большого поперечного сечения, технология устройства которых описана в [1], в том числе под опоры трубопроводов [2]. Преимущества пирамидальных свай заключается в том, что в верхней части свая имеет развитое сечение, что позволяет смонтировать на одну сваю колонну, т.е. исключает применение ростверка, который не является несущим по грунту конструктивным элементом, а по объему составляет до половины кустового свайного фундамента.

На фундаменты каркасных зданий и сооружений, наряду с вертикальными, действуют и значительные горизонтальные нагрузки и моменты (особенно в опорах трубопроводов), поэтому вопросы расчета таких свай на эти факторы имеют важное практическое значение. Однако в нормативных документах отсутствуют положения по расчету таких свай на горизонтальную нагрузку.

Вместе с тем, работа пирамидальных свай на горизонтальную нагрузку имеет ряд особенностей. За счет развитого поперечного сечения в верхней части сваи обеспечивается большее сопротивление горизонтальной нагрузке, чем у свай постоянного по длине сечения при равном их объеме. Изгибная жесткость пирамидальных свай изменяется по глубине, что следует учитывать в расчетной схеме.

Существующие методы расчета свай, в том числе и пирамидальных [3, 4], основаны на теории местных деформаций Фусса – Винклера, расчетной характеристикой грунта в которой является коэффициент постели, причем грунтовое основание рассматривается как однородное по глубине [5, 6], так и многослойное [7]. В случае однородного основания принимаются различные законы изменения коэффициента постели по глубине – по линейной зависимости [8], по нелинейной зависимости в виде параболы [9] или в виде степенных функций [10]. В работе [11] дается решение для горизонтально нагруженной сваи в упругом полупространстве, используя метод Б.Н. Жемочкина, а расчетные характеристики грунта определяются с использованием модуля деформации и коэффициента Пуассона. Все эти методы учитывают сопротивление грунта только по лобовой грани, перпендикулярной к плоскости действия нагрузки. Вместе с тем, в общем сопротивлении сваи действию горизонтальной нагрузки определенную долю составляет и сопротивление боковых граней вследствие трения грунта на их поверхности. Так, экспериментальными исследованиями установлено, что доля сопротивления горизонтальной нагрузке вследствие трения на боковых поверхностях пирамидальных свай может достигать 30–45 % от общего [12], причем эта составляющая растет с увеличением вертикальной нагрузки [13].

В работе [14] сделана попытка разработать методику расчета с учетом указанных факторов, но она позволяет находить лишь усилия в фундаменте, в то время как для практики проектирования важное значение имеет также и вопрос определения перемещений и угла поворота головы сваи.

В данной статье представлен более универсальный метод расчета пирамидальных свай на горизонтальную нагрузку и изгибающий момент с учетом действия вертикальной нагрузки и трения на боковых гранях свай.

Экспериментальные исследования

С целью изучения особенностей работы пирамидальных свай на совместное действие горизонтальной нагрузки, изгибающего момента и вертикальной нагрузки и построения на этой основе расчетной схемы были выполнены эксперименты в полевых условиях на натурных сваях.

Грунтовое основание опытной площадки представлено глинами тугопластичной консистенции ($\rho = 1,95 \text{ т/м}^3$, $c = 0,021 \text{ МПа}$, $\varphi = 18^\circ$, $E = 10 \text{ МПа}$).

На опытной площадке были изготовлены две опытные набивные пирамидальные сваи длиной 3,5 м, размером верхнего сечения $120 \times 110 \text{ см}$, нижнего $30 \times 30 \text{ см}$. В голове каждой сваи монтировались железобетонные колонны сечением $40 \times 60 \text{ см}$, высотой 5 м.

Испытания проводились в два этапа. Вначале сваи испытывались путем приложения горизонтальной нагрузки на уровне верха колонн, создавая тем самым горизонтальную нагрузку H_0 и моментную нагрузку $M_0 = hH_0$ (h – высота колонны). Затем проводилось второе испытание, в котором с помощью специальной системы нагрузка прикладывалась на уровне верха колонны наклонно, обеспечивая совместное действие на сваи вертикальной, горизонтальной нагрузки и изгибающего момента, причём с увеличением вертикальной нагрузки непрерывно пропорционально увеличивались горизонтальная нагрузка и изгибающий момент.

На рис. 1 представлены результаты статических испытаний свай на горизонтальную нагрузку (кривые 1 и 2) и на совместное действие вертикальной и горизонтальной нагрузок

(кривые $1в$ и $2в$). Как видно, вертикальная нагрузка увеличивает сопротивление сваи горизонтальной нагрузке на 30–38 % (при перемещении 10 мм), причём прирост горизонтального сопротивления сваи имеет место с самого начального момента загрузки. В соответствии с методикой испытания с ростом горизонтальной нагрузки пропорционально увеличиваются изгибающий момент и вертикальная нагрузка, что обеспечивает постоянный рост контактных нормальных, а, следовательно, и касательных напряжений на наклонных боковых поверхностях сваи, параллельных направлению действия горизонтальной нагрузки. Именно это увеличение касательных напряжений на боковой поверхности сваи обеспечивает повышение сопротивления сваи горизонтальной нагрузке.

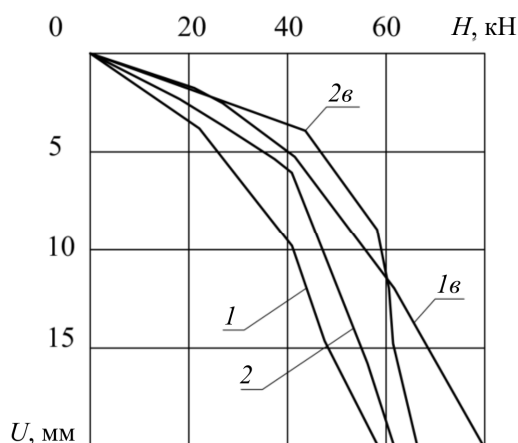


Рис. 1. Графики испытаний пирамидальной сваи на совместное действие нагрузок: 1 и 2 – испытание на горизонтальную нагрузку; $1в$ и $2в$ – испытание на совместное действие нагрузок
 Fig. 1. Pyramid pile test schedules for combined load action: 1 and 2 – horizontal load test; $1в$ and $2в$ – test for the combined action of loads

Таким образом, из анализа полученных экспериментальных данных следует, что на боковых гранях пирамидальных свай, параллельных направлению горизонтальной нагрузки, формируются касательные напряжения, которые участвуют в сопротивлении сваи горизонтальной нагрузке и их следует учитывать в расчётной схеме.

Метод расчета

Для построения расчётной схемы (рис. 2) примем следующие предпосылки.

1. Основание по глубине неоднородное, многослойное, разбито на n слоев с постоянными в пределах каждого слоя коэффициентами постели K_i и сопротивлениями трению f_i .
2. Размер стороны сечения сваи d_z с глубиной изменяется по линейной зависимости

$$d_z = d_o - \xi d_o z, \quad (1)$$

$$\xi = (d_o - d_n) / l d_o, \quad (2)$$

где d_o и d_n – размер стороны сечения соответственно верха и низа сваи, м; l – длина сваи в грунте, м; z – расстояние от поверхности грунта до рассматриваемого сечения сваи, м.

3. Изменение перемещения сваи U_z по глубине принимаем как для жесткого стержня в линейно деформируемой среде в виде

$$U_z = U_o (1 - z / l_o), \quad (3)$$

где U_o – перемещение сваи в уровне поверхности грунта, м; l_o – глубина расположения точки нулевых перемещений, м; $l_o = U_o / \varphi_o$; φ_o – угол поворота сваи в уровне поверхности грунта, рад.

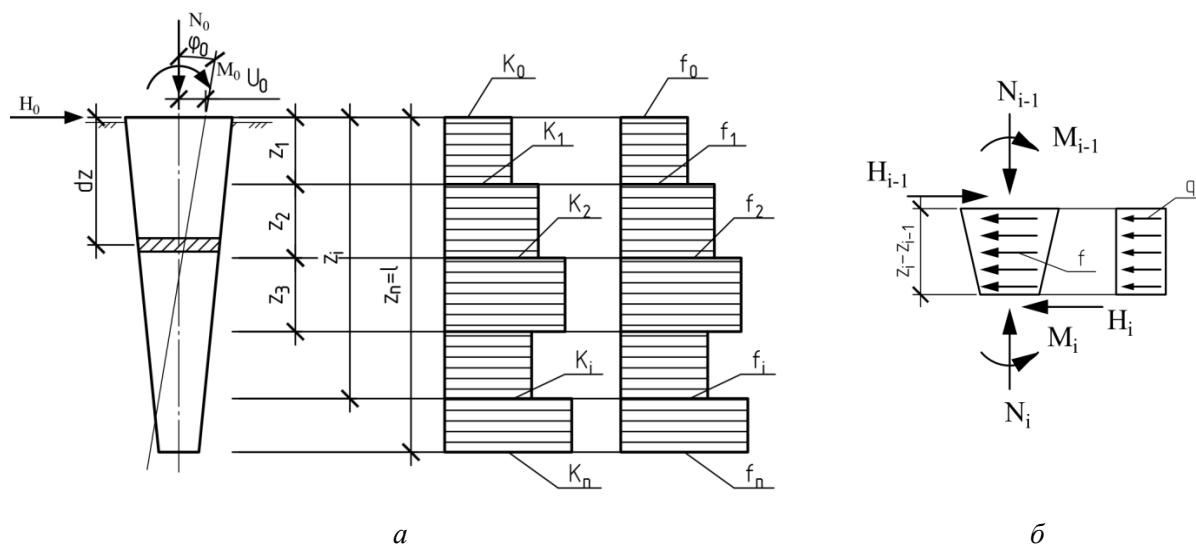


Рис. 2. Расчетная схема пирамидальной сваи: *a* – схема нагрузок и сопротивления грунта для сваи; *б* – то же, *i*-го участка сваи

Fig. 2. Design scheme of a pyramidal pile: *a* – scheme of loads and soil resistance for the pile; *б* – the same, *i*-th section of the pile

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

5. Удельное трение, развивающееся в горизонтальном направлении на боковой поверхности сваи при действии горизонтальной нагрузки, определяется зависимостью $f = k\tau$, где τ – предельное сопротивление грунта трению на контакте с боковой поверхностью сваи в горизонтальном направлении, кПа; k – коэффициент, учитывающий действие вертикальной нагрузки.

6. Сопротивление сваи горизонтальной нагрузке на единицу длины сваи за счет трения грунта на ее боковой поверхности определяется зависимостью

$$q_z^m = f_z d_z \quad (4)$$

Значение τ можно определять разными методами: по данным статического зондирования [15], по формуле Кулона, или по данным опытных работ.

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

$$K = \omega \frac{E_{oi} A_r}{(1 - \mu_i^2) d_{icp}}, \quad (5)$$

где ω – безразмерный коэффициент, зависящий от соотношения l/d_{cp} , принимаемый по табл. 5 в работе [16]; E_{oi} – модуль деформации *i*-го слоя грунта, определяемый по результатам штамповых испытаний, МПа; μ_i – коэффициент Пуассона *i*-го слоя грунта; A_r – безразмерный коэффициент, принимаемый равным 3,5 для забивных свай и набивных, бетонируемых в скважинах, образуемых выштамповкой; d_{cp} – средний размер стороны сечения сваи, м; d_{icp} – средний размер стороны сечения сваи в пределах *i*-го слоя, м.

В соответствии с расчетной схемой на рис. 2 из условия равновесия действующих и реактивных сил запишем поперечную силу Q_z и изгибающий момент M_z в произвольном сечении сваи z при действии на голову сваи горизонтальной нагрузки H_o и изгибающего момента M_o

$$Q_z = H_o - Q_z^{zp}; \quad M_z = M_o + H_o z - M_z^{zp}. \quad (6)$$

Исходя из принятых выше предпосылок запишем сопротивление грунта $q_{\bar{z}}$ на глубине \bar{z} :

$$q_{\bar{z}} = (d_o - \xi d_o \bar{z}) U_o \left(1 - \frac{\bar{z}}{l_o} \right) K_i + 2f_i (d_o - \xi d_o \bar{z}). \quad (7)$$

Найдем поперечную силу Q_z^{zp} и изгибающий момент M_z^{zp} в произвольном сечении сваи z от сопротивления грунта $q_{\bar{z}}$ i -го слоя

$$Q_{zi}^{zp} = U_o K_i d_o \int_{z_{i-1}}^{z_i} (1 - \xi \bar{z}) \left(1 - \frac{\bar{z}}{l_o} \right) d\bar{z} + 2f_i d_o \int_{z_{i-1}}^{z_i} (1 - \xi \bar{z}) d\bar{z}, \quad (8)$$

$$M_{zi}^{zp} = U_o K_i d_o \int_{z_{i-1}}^{z_i} (1 - \xi \bar{z}) \left(1 - \frac{\bar{z}}{l_o} \right) (z - \bar{z}) d\bar{z} + 2f_i d_o \int_{z_{i-1}}^{z_i} (1 - \xi \bar{z}) (z - \bar{z}) d\bar{z}. \quad (9)$$

После интегрирования выражений (8) и (9), суммирования по длине сваи до слоя j , в котором расположено сечение z , и преобразования с учетом значения l_o получим формулы для определения Q_z^{zp} и M_z^{zp} в сечении z от сопротивления q_z вышерассматриваемого сечения.

$$Q_z^{zp} = \frac{d_o}{12} (U_o \Phi_3 - \varphi_o \Phi_2) - \Phi_4; \quad (10)$$

$$M_z^{zp} = - \left[U_o \frac{d_o}{12} (\Phi_2 - z \Phi_3) + \varphi_o \frac{d_o}{12} (z \Phi_2 - \Phi_1) + z \Phi_4 + \Phi_5 \right]; \quad (11)$$

где

$$\Phi_{1z} = 4D - 3\xi C; \quad \Phi_{2z} = 6B - 4\xi D; \quad \Phi_{3z} = 12A - 6\xi B;$$

$$\Phi_{4z} = d_o (\xi \bar{B} - 2\bar{A}); \quad \Phi_{5z} = \frac{d_o}{3} (3\bar{B} - 2\xi \bar{D}); \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^j K_i (z_i - z_{i-1}); & B &= \sum_{i=1}^j K_i (z_i^2 - z_{i-1}^2); \\ D &= \sum_{i=1}^j K_i (z_i^3 - z_{i-1}^3); & C &= \sum_{i=1}^j K_i (z_i^4 - z_{i-1}^4) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{A} &= \sum_{i=1}^j f_i (z_i - z_{i-1}); & \bar{B} &= \sum_{i=1}^j f_i (z_i^2 - z_{i-1}^2); \\ & & \bar{D} &= \sum_{i=1}^j f_i (z_i^3 - z_{i-1}^3) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Подставив (10) и (11) в формулы (6), получим формулы для определения Q_z и M_z

$$Q_z = H_o - \frac{d_o}{12}(U_o \Phi_3 - \varphi_o \Phi_2) + \Phi_4; \quad (15)$$

$$M_z = M_o + H_o z + U_o \frac{d_o}{12}(\Phi_2 - z \Phi_3) + \varphi_o \frac{d_o}{12}(z \Phi_2 - \Phi_1) + z \Phi_4 + \Phi_5. \quad (16)$$

Принимая в (16) $z = l$, а в (13) и (14) $j = n$, с учетом граничных условий на нижнем конце сваи $Q_l = 0$, $M_l = 0$, получаем систему двух уравнений, из решения которой имеем формулы для определения перемещения U_o и угла поворота φ_o сваи в уровне поверхности грунта

$$\left. \begin{aligned} U_o &= (M_o \Phi_2 + H_o \Phi_1 + D') / \eta \\ \varphi_o &= (M_o \Phi_3 + H_o \Phi_2 + C') / \eta \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где $D' = \Phi_2 \Phi_5 + \Phi_1 \Phi_4$; $C' = \Phi_2 \Phi_4 + \Phi_3 \Phi_5$; $\eta = \frac{d_o}{12}(\Phi_1 \Phi_3 - \Phi_2^2)$;

$\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ и Φ_5 определяются по формулам (12), но при этом суммирование в них производится по всей длине сваи от $i = 1$ до $i = n$.

Рассмотрим частные случаи полученного решения.

Для случая, когда расчетные параметры грунта K и f можно представить в виде постоянной величины по глубине ($K_z = \text{const}$ и $f_z = \text{const}$), значения Q_z, M_z, U_o и φ_o определяются по формулам (15), (16) и (17), где принимают

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= K(4z^3 - 3\xi z^4); \quad \Phi_2 = K(6z^2 - 4\xi z^3); \\ \Phi_3 &= K(12z - 6\xi z^2); \quad \Phi_4 = d_o f(\xi z^2 - 2z); \\ \Phi_5 &= f \frac{d_o}{3}(3z^2 - 2\xi z^3). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Для случая, когда закономерность изменения коэффициента постели K и сопротивления трению f по глубине можно принять по треугольной эпюре (по аналогии с СНиП II-17-77) в виде $K_z = K_l z/l$; $f_z = f_l z/l$ значения Q_z, M_z, U_o и φ_o также определяются по (15), (16) и (17), где $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_5$ находят из выражений

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= K_l(15z^4 - 12\xi z^5) / 5l; \quad \Phi_2 = K_l(4z^3 - 3\xi z^4) / l \\ \Phi_3 &= K_l(6z^2 - 4\xi z^3) / l; \quad \Phi_4 = f_l d_o(2\xi z^3 - 3z^2) / 3l; \\ \Phi_5 &= f_l d_o(4z^3 - 3\xi z^4) / 6l, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

здесь K_l и f_l – коэффициент постели и сопротивление трению грунта по глубине l .

При определении U_o и φ_o в (17) и (18) следует принимать $z = l$.

Для призматической сваи ($\xi = 0$) в неоднородном основании формулы для определения Q_z, M_z, U_o и φ_o будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} Q_z &= H_o - \frac{d}{2}(2U_o A - \varphi_o B) - 2dA; \\ M_z &= M_o + H_o z + U_o \left(\frac{d}{12} B - 2zA \right) + \varphi_o \frac{d_o}{12} \left(zB + \frac{2}{3} D \right) + d(B - 2zA); \\ U_o &= \frac{\frac{2}{3} D H_o + B M_o + D''}{\bar{\eta}}; \\ \varphi_o &= (B H_o + 2 A M_o + C'') / \bar{\eta}, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где $D'' = \frac{d}{3}(3B\bar{B} - 4\bar{A}D)$; $C'' = 2d(A\bar{B} - \bar{B}A)$; $\bar{\eta} = \frac{d}{6}(4DA - 3B^2)$;

A, B, D, \bar{A} и \bar{B} находятся по формулам (13) и (14).

Принимая в (15) и (16) $\Phi_4 = \Phi_5 = 0$, а в (17) $D' = C' = 0$, получаем решение для случая, когда трение на боковой поверхности сваи не учитывается.

Значение трения на боковой поверхности сваи в горизонтальном направлении целесообразно определять с использованием данных статического зондирования

$$f = \beta_f f_s k, \quad (21)$$

где β_f – коэффициент перехода от зонда к свае; f_s – сопротивление трению грунта, определяемое по данным статического зондирования, кПа; k – коэффициент, учитывающий влияние вертикальной нагрузки.

Коэффициент β_f определяется в соответствии с [15] по формуле

$$\beta_f = 0,13 + 0,44 (z / l)^2, \quad (22)$$

где z и l – глубина расположения слоя и длина сваи, м.

Коэффициент k после обработки экспериментальных данных определяется как

$$k = 0,6 + 0,4 (N / F), \quad (23)$$

где N и F – вертикальная нагрузка на сваю и предельное сопротивление сваи вертикальной нагрузке соответственно, кН.

Для оценки достоверности разработанного метода были выполнены расчеты пирамидальных свай, испытанных на горизонтальную нагрузку на четырех площадках, сложенных глинистыми грунтами различной консистенции, с учетом и без учета трения грунта на боковой поверхности свай, и их результаты сопоставлены с данными статических испытаний (таблица).

Сравнение показывает, что результаты расчетов по предлагаемому методу лучше согласуются с данными испытаний. Расхождение между ними составляет в среднем 13 % против 32 при расчете без учета трения на боковой поверхности свай.

По обоим методам также определялись эпюры изгибающих моментов и поперечных сил для сваи сечением $\frac{60 \times 60}{20 \times 20}$ см, длиной 3,5 м (рис. 3). Сравнение результатов показало, что учет трения на боковой поверхности сваи не приводит к существенному изменению усилий в ней. Отмечается лишь некоторое перераспределение по длине поперечной силы.

Сравнение результатов испытаний и расчетов

Comparison of test results and calculations

Размеры сваи		Нагрузки на сваю		Перемещения головы сваи, мм		
сечение, см	длина, м	P_0 , кН	M_0 , кНм	по испытанию	по расчету	
					без учета трения на боковой поверхности	с учетом трения на боковой поверхности
$\frac{60 \times 60}{20 \times 20}$	3,5	70	21	10	$\frac{12}{20^*}$	$\frac{10,4}{4^*}$
$\frac{60 \times 60}{20 \times 20}$	5,5	160	30	10	$\frac{13,2}{32}$	$\frac{9,0}{10}$
$\frac{120 \times 100}{30 \times 30}$	3,6	44	205	10	$\frac{12,3}{23}$	$\frac{9,6}{4}$
$\frac{75 \times 80}{30 \times 30}$	4,4	115	20	10	$\frac{12,4}{24}$	$\frac{11,3}{13}$

Примечание: *В знаменателе приводится расхождение с данными испытаний, %.

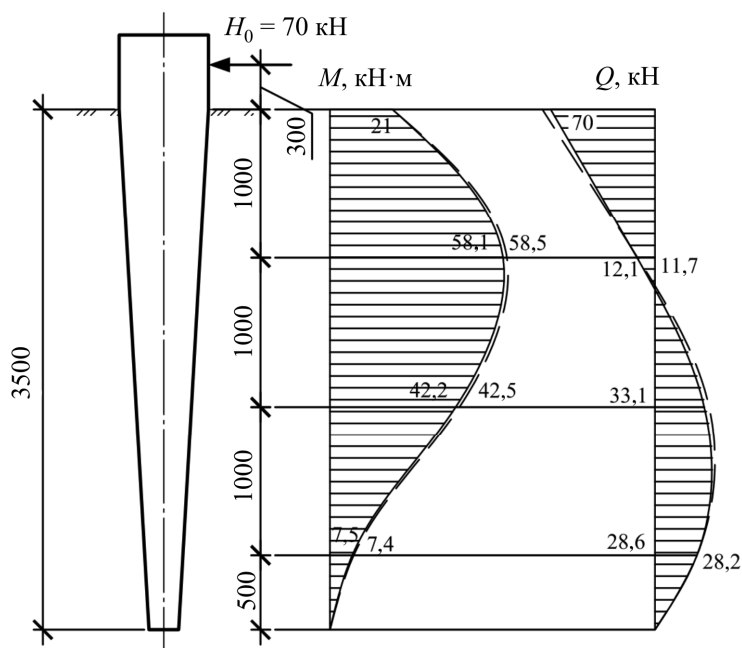


Рис. 3. Эпюры изгибающих моментов M и поперечных сил Q : сплошная линия – расчет по предложенному методу; пунктир – расчет без учета трения

Fig. 3. Diagrams of bending moments M and transverse forces Q : solid line – calculation according to the proposed method; dashed line – calculation without taking into account friction

Выводы

На основании экспериментальных исследований, выполненных в полевых условиях на натуральных сваях, установлено, что вертикальная нагрузка увеличивает сопротивление пирамидальной сваи горизонтальной нагрузке за счет дополнительного сопротивления сил

трения на наклонных гранях свай, и показана необходимость учета этого фактора при расчете таких свай на горизонтальную нагрузку.

Построена расчетная схема горизонтально нагруженной пирамидальной сваи на основе винклеровской модели с учетом сопротивления сил трения на наклонных гранях свай параллельно направлению действия горизонтальной нагрузки, и разработан метод расчета таких свай на совместное действие горизонтальной, моментной и вертикальной нагрузок.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Яковлев П.И., Готман А.Л., Курмаев Р.Г. Взаимодействие сооружений с грунтом и свайные основания. – Одесса: Астропринт, 2004. – 510 с.
2. Готман А.Л., Фукс М.З., Галеев Р.Г. Разработка и возведение односвайных фундаментов под тяжелонагруженные опоры трубопроводов // Свайные фундаменты: сб. науч. тр. – Уфа: НИИПромстрой, 1984. – С. 37–48.
3. Багдасаров Ю.А. Расчет осадок фундаментов в вытрамбованных котлованах на воздействие вертикальных и горизонтальных нагрузок // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1984. – № 4. – С. 11–14.
4. Шахирев В.Б. Расчет пирамидальных свай на горизонтальную нагрузку // Вопросы строительства и архитектуры. – 1989. – № 17. – С. 87–90.
5. Лучковский И.Я., Лекумович Г.С. К вопросу о расчете свай на горизонтальную нагрузку в связном грунте // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1971. – № 3. – С. 17–18.
6. Готман А.Л., Крутяев С.А. Исследования работы горизонтально нагруженных пирамидальных свай и их расчет // Геотехника. – 2020. – Т. XII, № 3. – С. 26–32.
7. Зиязов Я.Ш. К расчету сжато-изогнутых свай, находящихся в многослойном основании // Инженерно-геологические условия и особенности фундаментостроения в Сибири: Тр. НИИЖТ. – 1972. – Вып. 133. – С. 144–151.
8. Миронов В.С. Практический метод расчета свай на совместное действие горизонтальных нагрузок // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1965. – № 5. – С. 15–18.
9. Буслов А.С. Работа свай на горизонтальную нагрузку за пределами упругости в связных грунтах. – Ташкент: Фан, 1979. – 106 с.
10. Мамедов К.М. К расчету гибких и жестких пирамидальных свай, подверженных совместному действию вертикальных и горизонтальных нагрузок // Ученые записки вузов Министерства высшего и среднего образования Азербайджанской ССР. – 1974. – Серия X, № 2. – С. 106–113.
11. Огранович А.Б. Расчет гибкой пирамидальной сваи в упругом полупространстве на горизонтальную нагрузку // Известия вузов. – 1990. – № 5. – С. 110–112.
12. Гильман Я.Д., Глухов В.С. Особенности деформирования лессового основания горизонтально нагруженных клиновидных свай // Вопросы исследования лессовых грунтов, оснований и фундаментов: межвуз. сб. – Ростов н/Д: РИСИ, 1982. – С. 47–54.

13. Орел А.А., Циунчик Б.И., Борисевич М.М. Влияние вертикальной пригрузки на сопротивление свай горизонтальной силе // *Транспортное строительство*. – 1983. – № 2. – С. 11–12.
14. Нисенбойм О.Б. Расчет усилий в фундаментах пирамидальной формы // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 1984. – № 6. – С. 19–21.
15. Готман А.Л., Зиязов Я.Ш. Определение несущей способности набивных свай в выштампованном ложе // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 1984. – № 2. – С. 12–15.
16. Рекомендации по проектированию и устройству односвайных фундаментов из штампованных свай. – Уфа: НИИпромстрой, 1984. – 56 с.

References

1. Yakovlev P.I., Gotman A.L., Kurmaev R.G. *Vzaimodeystviye sooruzheniy s gruntom i svaynyye osnovaniya* [Interaction of structures with soil and pile foundations]. Odessa, Astroprint, 2004, 510 p.
2. Gotman A.L., Fuks M.Z., Galeev R.G. *Razrabotka i vozvedeniye odnosvaynykh fundamentov pod tyazhelonagruzhennyye opory truboprovodov* [Development and construction of single-pile foundations for heavily loaded pipeline supports]. *Svaynyye fundamenty: Sbornik nauchnykh trudov*. Ufa, NIIpromstroy, 1984, pp. 37-48.
3. Bagdasarov Yu.A. *Raschet osadok fundamentov v vytrambovannykh kotlovanakh na vozdeystviye vertikal'nykh i gorizonta'nykh nagruzok* [Calculation of settlement of foundations in rammed pits for the effect of vertical and horizontal loads]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1984, no. 4, pp. 11-14.
4. Shakhirev V.B. *Raschet piramidal'nykh svay na gorizonta'nuyu nagruzku* [Calculation of pyramidal piles for a horizontal load]. *Voprosy stroitel'stva i arkhitektury*, Minsk, 1989, no. 17, pp. 87-90.
5. Luchkovsky I.Ya., Lekumovich G.S. *K voprosu o raschete svay na gorizonta'nuyu nagruzku v svyaznom grunte* [On the issue of calculating piles for horizontal loads in cohesive soil]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1971, no. 3, pp. 17-18.
6. Gotman A.L., Krutyaev S.A. *Issledovaniya raboty gorizonta'no nagruzhennykh piramidal'nykh svay i ikh raschet* [Studies of the work of horizontally loaded pyramidal piles and their calculation]. *Geotekhnika*, 2020, Vol. XII, no. 3, pp. 26-32.
7. Ziyazov Ya.Sh. *K raschetu szhato-izognutykh svay, nakhodyashchikhsya v mnogosloynnom osnovanii* [To the calculation of compressed-curved piles located in a multilayer foundation]. *Inzhenerno-geologicheskkiye usloviya i osobennosti fundamentostroyeniya v Sibiri*, Trudy NIIZhT, 1972, iss. 133, pp. 144-151.
8. Mironov V.S. *Prakticheskiy metod rascheta svay na sovmestnoye deystviye gorizonta'nykh nagruzok* [A practical method for calculating piles for the combined action of horizontal loads]. *Izvestia Vuzov. Construction and Architecture*, 1965, no. 5, pp. 15-18.
9. Buslov A.S. *Rabota svay na gorizonta'nuyu nagruzku za predelami uprugosti v svyaznykh gruntakh* [Work of piles on a horizontal load beyond the limits of elasticity in cohesive soils]. Tashkent, Fan, 1979, pp. 106.
10. Mamedov K.M. *K raschetu gibkikh i zhestkikh piramidal'nykh svay, podverzhennykh sovmestnomu deystviyu vertikal'nykh i gorizonta'nykh nagruzok* [To the calculation of flexible

and rigid pyramidal piles subject to the combined action of vertical and horizontal loads]. *Zapiski vuzov Ministerstva vysshego i srednego obrazovaniya Azerbaydzhanskoj SSR*, Series X, № 2, 1974, pp. 106-113.

11. Ogranovich A.B. *Raschet gibkoy piramidal'noy svai v uprugom poluprostranstve na gorizontaľnuyu nagruzku* [Calculation of a flexible pyramidal pile in an elastic half-space for a horizontal load]. *Izvestia Vuzov*, 1990, no. 5, pp. 110-112.

12. Gilman Ya.D., Glukhov V.S. *Osobennosti deformirovaniya lessovogo osnovaniya gorizontaľno nagruzhennykh klinovidnykh svay* [Peculiarities of deformation of the loess foundation of horizontally loaded wedge-shaped piles]. *Voprosy issledovaniya lessovykh gruntov, osnovaniy i fundamentov*, Rostov-on-Don, RISI, 1982, pp. 47-54.

13. Orel A.A., Tsiunchik B.I., Borisevich M.M. *Vliyaniye vertikal'noy prigruzki na soprotivleniye svay gorizontaľnoy sile* [Influence of vertical loading on the resistance of piles to horizontal force]. *Transportnoye stroitel'stvo*, 1983, no. 2, pp. 11-12.

14. Nisenboim O.B. *Raschet usiliy v fundamentakh piramidal'noy formy* [Calculation of efforts in pyramidal foundations]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1984, no. 6, pp. 19-21.

15. Gotman A.L., Ziyazov Ya.Sh. *Opredeleniye nesushchey sposobnosti nabivnykh svay v vyshtampovannom lozhe* [Determination of the bearing capacity of stuffed piles in a stamped bed]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1984, no. 2, pp. 12-15.

16. *Rekomendatsii po proyektirovaniyu i ustroystvu odnosvaynykh fundamentov iz shtampobivnykh svay* [Recommendations for the design and installation of single-pile foundations from stamped piles]. Ufa, NIIPromstroy, 1984, 56 p.