

---

**ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ / BASES AND FOUNDATIONS,  
UNDERGROUND STRUCTURES**


---

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.1>**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА СДВИГОВОЙ ОСАДКИ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ**

Научная статья

**Шмидт О.А.<sup>1,\*</sup>**<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-0476-277X;<sup>1</sup> Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (shmidtolog55[at]list.ru)

**Аннотация**

В рамках исследования совершенствуется метод расчета сдвиговой осадки буронабивных свай. В результате анализа состояния установлено, что сдвиговая осадка используется как один из основных параметров в нескольких методах расчета свай и свайных фундаментов. При этом само значение сдвиговой осадки в большинстве случаев берется либо по табличным значениям (которые установлены для забивных свай), либо по результатам дорогостоящих полевых испытаний. На сегодняшний день отсутствует общепринятый аналитический метод расчета сдвиговой осадки, позволяющий устанавливать ее значения на этапе проектирования. Предлагаемый метод расчета основан на решении задачи теории упругости в плоской постановке. Аналитическая модель представляет собой вытянутый вдоль вертикальной оси вырез эллиптической формы. Решение задачи выполняется относительно перемещений выреза в линейно деформируемом полупространстве. Для решения модель отображается на конформно вспомогательную полуплоскость через функции отображения. В результате решения второй основной задачи теории упругости были получены функции напряжений и уравнения для определения главных и касательных напряжений на границах выреза при его перемещении. Для определения сдвиговой осадки полученные в ходе решения уравнения касательные напряжения на границах контура приравниваются к эпюре распределения сопротивления по боковой поверхности. Перемещение контура, при котором все значения максимальных касательных напряжений окажутся больше либо равны сопротивлению сваи по боковой поверхности (по всей ее длине), будет соответствовать сдвиговой осадке. Представленный метод расчета был апробирован на объекте по ул. Таврической в г. Сочи. Фундамент проектируемого здания был выполнен из буровых свай длиной 23,5 м и диаметром 0,63 м. В результате расчета сдвиговая осадка сваи составила 1,22 мм. В результате верификационного расчета по графоаналитическому методу, предложенному Б.И. Далматовым (1975), была получена удовлетворительная сходимость результатов.

**Ключевые слова:** буронабивные сваи, метод расчета, сдвиговая осадка, плоская задача, касательные напряжения.**IMPROVEMENT OF A METHOD FOR CALCULATING SHEAR SETTLEMENT OF BORED PILES**

Research article

**Shmidt O.A.<sup>1,\*</sup>**<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-0476-277X;<sup>1</sup> Kuban State Agrarian University named I. T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

\* Corresponding author (shmidtolog55[at]list.ru)

**Abstract**

In the framework of the research, the method of calculating the shear draft of bored piles is being improved. As a result of the analysis of the state, it is established that the shear sediment is used as one of the main parameters in several methods for calculating piles and pile foundations. At the same time, the very value of the shear draft in most cases is taken either according to tabulated values (which are set for driven piles) or by the results of expensive field tests. To date, there is no generally accepted analytical method for calculating shear sediment, which allows to determine its values at the design stage. The proposed method of calculation is based on the solution of the problem of the theory of elasticity in a plane formulation. The analytical model is an elongated neckline elongated along the vertical axis. The solution of the problem is performed with respect to the displacements of the notch in a linearly deformed half-space. For the solution, the model is mapped onto the conformally auxiliary half-plane through the mapping functions. As a result of solving the second fundamental problem of elasticity theory, stress functions and equations were obtained for determining the principal and tangential stresses at the cut-off boundaries as it moved. To determine the shear sediment, the tangential stresses at the boundaries of the contour obtained during the solution of the equation are equated to the diagram of the distribution of resistance along the lateral surface. The movement of the contour in which all values of the maximum tangential stresses are greater than or equal to the pile resistance along the lateral surface (along its entire length) will correspond to the shear draft. The presented method of calculation was approved at the facility at Tavricheskaya str. in the city of Sochi. The foundation of the projected building was made of drilling piles 23,5 m long and 0,63 m in diameter. As a result of the calculation, the shear draft of the pile was 1,22 mm. As a result of the verification calculation according to the graphoanalytical method proposed by B.I. Dalmatov (1975), the satisfactory convergence of the results was obtained.

**Keywords:** bored pile, calculation method, shear settlement, flat problem, tangential stresses.

## Введение

Согласно данным последних исследований, в диапазоне эксплуатационных нагрузок можно выделить два основных участка. Первый участок начинается с момента приложения нагрузки на сваю и характеризуется активным включением ее боковой поверхности. После достижения определенного перемещения сваи сопротивление по боковой поверхности достигает предельного значения, и вся дальнейшая нагрузка приходится на ее нижний конец. Осадка, соответствующая данному перемещению, является сдвиговой [1]. Учитывая, что в пределах эксплуатационных нагрузок осадка сваи может оказаться как в пределах до сдвиговой (например, для длинных свай, как это приводится в источнике [2]), так превышающей ее, многими авторами выделяются различные методы расчета на данных участках [3], [4]. Соответственно, корректное определение сдвиговой осадки на этапе проектирования фундамента позволяет избежать ошибок в выборе метода расчета конечной осадки зданий и сооружений. Также установлено, что при осадке сваи меньше сдвиговой практически нивелируется ее приращение в ходе нескольких циклов нагружения и разгрузки [5].

Согласно исследованиям, проводимым Ф.К. Лапшиным и Б.И. Далматовым, значения сдвиговой осадки забивных свай колеблются в зависимости от вида грунта в пределах 5–25 мм [1]. Кроме того, авторами была разработана графоаналитическая методика определения сдвиговой осадки забивных свай по результатам статических испытаний. Методика заключается в логарифмировании зависимости «осадка сваи – приложенная сила» и последующем определении пересечения двух прямых линий, характеризующих работу сваи до и после сдвиговой осадки [6]. Также существует инженерный метод определения нагрузки на буронабивную сваю, соответствующей ее сдвиговой осадке, описанный в источнике [7]. Данный метод основан на разбиении осадки сваи в пределах эксплуатационных нагрузок на два участка – до и после сдвиговой осадки. Перемещения сваи на первом участке описываются формулой, предложенной В.Г. Федоровским [8], а на втором – формулой Шлейхера для круглого штампа. Осадка, соответствующая точке пересечения двух прямых, является сдвиговой. Основным недостатком данного метода можно считать необходимость проведения штамповых испытаний в уровне нижнего конца свай, что представляется трудоемким и технически сложным процессом. Также следует отметить инженерный метод определения сдвиговой осадки, основанный на результатах обработки около 50 буронабивных свай [13].

Основные существующие методики определения сдвиговой осадки основаны либо на эмпирических данных, либо на основе результатов специфических и дорогостоящих испытаний. В случае необходимости определения значений сдвиговой осадки в процессе проектирования фундаментов приходится руководствоваться табличными данными, которые не всегда соответствуют действительности, так как не учитывают геометрические характеристики свай и неоднородность грунтов вдоль боковой поверхности. Зависимость сдвиговой осадки от геометрических размеров сваи установлена для глинистых грунтов в ходе численных исследований [9].

## Основные результаты

Предлагаемая методика основана на решении плоской задачи теории упругости. Свая представляется в виде вытянутого в вертикальном направлении выреза со сглаженным концом при  $x = 0$  и  $y = ix$ . Расчетная схема задачи приведена на рис. 1.

Зададим точкам выреза одинаковое перемещение вдоль оси  $oy$ :  $g_2 = -v_0$

Отобразим конформно вспомогательную полуплоскость без выреза при  $\eta \geq 0$  (Рис. 1б) на заданную полуплоскость с вырезом следующей функцией [10]:

$$\begin{aligned} Z_h &= \omega(\zeta_h) = \sqrt{a^2 \cdot \zeta_h^2 - h^2} + \zeta_h; \\ Z_h &= x_h + iy_h; \\ \zeta_h &= \xi_h + i\eta_h. \end{aligned} \quad (1)$$

Представим соответствие точек при конформном отображении:

$$\begin{aligned} \zeta_h = 0 &\rightarrow Z_h = ih \quad (B_2 \rightarrow b_2); \\ \zeta_h = \frac{h}{a} &\rightarrow Z_h = \frac{h}{a} \quad (B_3 \rightarrow b_3); \\ \zeta_h = -\frac{h}{a} &\rightarrow Z_h = -\frac{h}{a} \quad (B_1 \rightarrow b_1); \\ \zeta_h = \infty &\rightarrow Z_h = \infty \quad (B_4 \rightarrow b_4). \end{aligned}$$

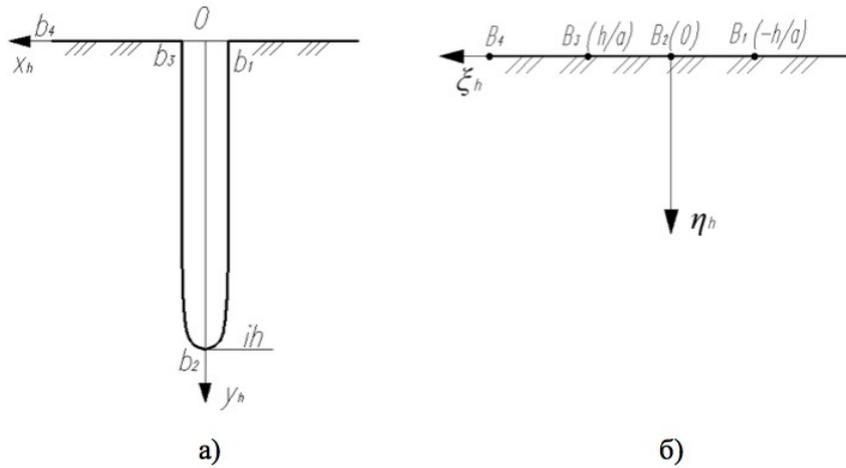


Рисунок 1 - Расчетная схема  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.1.1>

Примечание: а) расчетная область; б) вспомогательная полуплоскость

Отображение точек контура  $-\infty < \xi < +\infty, \eta > 0$  выражается функцией:

$$Z_h = i\sqrt{h^2 - a^2 \cdot \xi_h^2} + \xi_h, \quad |\xi_h| \leq \frac{h}{a}; \quad (2)$$

$$x_h = \sqrt{a^2 \cdot \xi_h^2 - h^2} + \xi_h, \quad |\xi_h| > \frac{h}{a}. \quad (3)$$

Формулу (2) заменим на формулу (4) в параметрическом виде и в относительных координатах:

$$\frac{x_h}{h} = \frac{\xi_h}{h}; \frac{y_h}{h} = \sqrt{1 - a^2 \cdot \left(\frac{\xi_h}{h}\right)^2}, \quad |\xi_h| > \frac{h}{a}. \quad (4)$$

Формулу (3) заменим формулой (5):

$$\frac{x_h}{h} = \sqrt{a^2 \cdot \left(\frac{\xi_h}{h}\right)^2 - 1} + \frac{\xi_h}{h}; \quad |\xi_h| > \frac{h}{a}. \quad (5)$$

Для упрощения записи заменим в (4) и (5) абсолютные координаты на относительные:

$$\frac{x_h}{h} = x; \frac{y_h}{h} = y; \frac{\xi_h}{h} = \xi,$$

т. е. на границе области имеем:

$$x = \xi; y = \sqrt{1 - a^2 \cdot \xi^2}, \quad |\xi| \leq \frac{1}{a};$$

$$x = \sqrt{a^2 \cdot \xi^2 - 1} + \xi, \quad |\xi| > \frac{1}{a}.$$

Для решения второй основной задачи теории упругости необходимо определить функции напряжений  $\varphi(\zeta)$  и  $\psi(\zeta)$ , удовлетворяющие дифференциальному уравнению [11]:

$$2 \cdot \mu \cdot (g_1 + ig_2) = \varkappa \cdot \varphi(\zeta) - \frac{\omega(\zeta)}{\omega'(\zeta)} \cdot \overline{\varphi'(\zeta)} + \overline{\psi(\zeta)}, \quad (6)$$

где  $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ,  $\varkappa = 3 - 4\nu$ ;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$E$  – модуль упругости;

$g_1$  и  $g_2$  – перемещения вдоль осей  $Ox$  и  $Oy$  соответственно.

$$\frac{\omega(\zeta)}{\omega'(\zeta)} = \frac{(\sqrt{a^2\zeta^2-1}+\zeta) \cdot \sqrt{a^2\zeta^2-1}}{a^2\zeta+\sqrt{a^2\zeta^2-1}}.$$

На границе вспомогательной полуплоскости ( $\eta = 0$ )  $\zeta = \xi$  – действительная переменная. Обозначим  $\xi = t, -\infty < t < +\infty$ . Для точек границы уравнение (6) примет вид:

$$2 \cdot \mu \cdot ig_2 = \alpha \cdot \varphi(t) - \frac{\omega(t)}{\omega'(t)} \cdot \overline{\varphi'(t)} + \overline{\psi(t)}. \quad (7)$$

Умножим обе части уравнения (7) на дробь  $\frac{dt}{2\pi i \cdot (t-\zeta)}$  и проинтегрируем его по Коши:

$$-\frac{\mu \cdot v_0}{\pi} \int_{-\frac{1}{a}}^{\frac{1}{a}} \frac{dt}{t-\zeta} = \alpha \cdot \varphi(\zeta),$$

или

$$\varphi(\zeta) = \frac{-\mu \cdot v_0}{\pi \cdot \alpha} \ln \frac{1/a-\zeta}{1/a+\zeta}. \quad (8)$$

Выражение (8) стремится к нулю при  $\zeta \rightarrow \infty$ .

Сопряженное к (7) уравнение имеет вид:

$$-2 \cdot \mu \cdot ig_2 = \alpha \cdot \overline{\varphi(t)} - \frac{\overline{\omega(t)}}{\omega'(t)} \cdot \varphi'(t) + \psi(t), \quad (9)$$

где  $g_2 \begin{cases} -v_0, & -1/a \leq t \leq 1/a \\ 0, & |t| > 1/a. \end{cases}$

$$\frac{\overline{\omega(t)}}{\omega'(t)} = \frac{(\sqrt{a^2 \zeta^2 - 1 + \zeta}) \cdot \sqrt{a^2 \zeta^2 - 1}}{a^2 \zeta + \sqrt{a^2 \zeta^2 - 1}}. \quad (10)$$

Умножим обе части уравнения (9) на дробь  $\frac{dt}{2\pi i \cdot (t-\zeta)}$  и проинтегрируем его по Коши от  $t = -\infty$  до  $t = +\infty$ :

$$\frac{\mu \cdot v_0}{\pi} \int_{-\frac{1}{a}}^{\frac{1}{a}} \frac{dt}{t-\zeta} = -\frac{(\sqrt{a^2 \zeta^2 - 1 + \zeta}) \cdot \sqrt{a^2 \zeta^2 - 1}}{a^2 \zeta + \sqrt{a^2 \zeta^2 - 1}} \varphi'(\zeta) - \psi(\zeta), \quad (11)$$

откуда

$$\psi(\zeta) = \frac{-\mu \cdot v_0}{\pi} \ln \frac{1/a-\zeta}{1/a+\zeta} - \left( \frac{(\sqrt{a^2 \zeta^2 - 1 + \zeta}) \cdot \sqrt{a^2 \zeta^2 - 1}}{a^2 \zeta + \sqrt{a^2 \zeta^2 - 1}} \right)_{\omega} \cdot \frac{\mu \cdot v_0}{\pi \cdot \alpha} \cdot \frac{2/a}{1/a^2 - \zeta^2}; \quad (12)$$

Выражение (12) стремится к нулю при  $\zeta \rightarrow \infty$ .

$$\varphi'(\zeta) = \frac{-\mu \cdot v_0}{\pi \cdot \alpha} \left( \frac{-1}{1/a-\zeta} - \frac{1}{1/a+\zeta} \right) = \frac{\mu \cdot v_0}{\pi \cdot \alpha} \cdot \frac{2/a}{1/a^2 - \zeta^2}. \quad (13)$$

**Вычисление напряжений на границах контура.** Вычисления напряжений через вспомогательные координаты производится по формулам [11]:

$$\begin{cases} \sigma_{\xi} + \sigma_{\eta} = 4 \operatorname{Re} \Phi(\zeta) \\ \sigma_{\eta} - \sigma_{\xi} + 2i\tau_{\xi\eta} = \frac{2}{\omega'(\zeta)} \left( \overline{\omega(\zeta)} \cdot \Phi'(\zeta) + \omega'(\zeta) \cdot \Psi(\zeta) \right), \end{cases} \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi(\zeta) &= \varphi'(\zeta); \\ \Psi(\zeta) &= \psi'(\zeta). \end{aligned}$$

В заданных координатах (x;y):

$$\begin{cases} \sigma_{\xi} + \sigma_{\eta} = \sigma_x + \sigma_y \\ \sigma_{\eta} - \sigma_{\xi} + 2i\tau_{\xi\eta} = (\sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy}) \frac{\omega'(\zeta)}{\omega'(\zeta)}. \end{cases} \quad (15)$$

Первое из уравнений (14) и (15) для  $\zeta = t$  при  $t \leq 1/a$  примет вид:

$$\sigma_{\xi} + \sigma_{\eta} = \frac{\mu \cdot v_0}{\pi \cdot \alpha} \cdot \frac{2/a}{1-a^2 t^2} = a_1 \cdot v_0 \cdot \frac{2/a}{1-a^2 t^2}. \quad (16)$$

Распишем слагаемые для второго уравнения из формулы (14):

$$1) \Phi'(\zeta) = \varphi''(\zeta)|_{|t| \leq 1/a} = \frac{\mu \cdot v_0}{\pi \cdot \alpha} \cdot \frac{4t}{\left(\frac{1}{a^2 t^2}\right)} = a_1 v_0 \frac{4a^3 t}{(1-a^2 t^2)^2}$$

$$2) \Psi(\zeta) = \psi'(\zeta)|_{|t| \leq 1/a}$$

$$\begin{aligned} \frac{\overline{\omega(\zeta)}}{\overline{\omega'(\zeta)}} \Big|_{|t| \leq \frac{1}{a}} &= \frac{(-i\sqrt{1-a^2t^2}+t)(-i\sqrt{1-a^2t^2})}{a^2t-i\sqrt{1-a^2t^2}} = \\ &= \frac{(-1+a^2t^2-it\sqrt{1-a^2t^2})(a^2t+i\sqrt{1-a^2t^2})}{a^4t^2+1-a^2t^2} = r_1 + ir_2, \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{a^2t(a^2t^2-1)+t(1-a^2t^2)}{a_7} = \frac{t(1-a^2t^2)(1-a^2)}{a_7} \\ r_2 &= \frac{-\sqrt{1-a^2t^2}}{a_7} \\ a_7 &= a^4t^2+1-a^2t^2; \quad a_1 = \frac{\mu}{\pi a} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\omega'(\zeta)}{\omega'(\zeta)} \Big|_{|t| \leq \frac{1}{a}} &= \frac{(a^2t+i\sqrt{1-a^2t^2})(-i\sqrt{1-a^2t^2})}{(a^2t-i\sqrt{1-a^2t^2})(i\sqrt{1-a^2t^2})} = \\ &= -\frac{(a^2t+i\sqrt{1-a^2t^2})^2}{a^4t^2+1-a^2t^2} = g_1 + iq_2, \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} g_1 &= -\frac{a^4t^2-1+a^2t^2}{a_7} \\ q_2 &= -\frac{2a^2t\sqrt{1-a^2t^2}}{a_7} \end{aligned}$$

Из формулы (3) проинтегрируем фрагмент с индексом «w»:

$$\begin{aligned} (\dots)'_w &= \frac{\left( \left( \frac{a^2\zeta}{\sqrt{a^2\zeta^2-1}} + 1 \right) \sqrt{a^2\zeta^2-1} + \left( \sqrt{a^2\zeta^2-1} + \zeta \right) \frac{a^2\zeta}{\sqrt{a^2\zeta^2-1}} \right) a_3}{a_3^2} - \\ &= \frac{\left( \sqrt{a^2\zeta^2-1} + \zeta \right) \sqrt{a^2\zeta^2-1} \left( a^2 + \frac{a^2\zeta}{\sqrt{a^2\zeta^2-1}} \right)}{a_3^2}, \end{aligned}$$

где  $a_3 = a^2\zeta + \sqrt{a^2\zeta^2-1}$ .

При  $\zeta = t$  и  $|t| \leq \frac{1}{a}$  имеем:

$$\begin{aligned} (\dots)'_w \Big|_{|t| \leq \frac{1}{a}} &= \frac{\left( \frac{a^2t}{-i\sqrt{1-a^2t^2}} + 1 \right) i\sqrt{1-a^2t^2}}{a^2t+i\sqrt{1-a^2t^2}} + \frac{\frac{(-i\sqrt{1-a^2t^2}+t)a^2t}{i\sqrt{1-a^2t^2}}}{a^2t+i\sqrt{1-a^2t^2}} - \\ &= \frac{(-i\sqrt{1-a^2t^2}+t)i\sqrt{1-a^2t^2} \cdot a^2 \frac{i\sqrt{1-a^2t^2}+t}{i\sqrt{1-a^2t^2}}}{(a^2t+i\sqrt{1-a^2t^2})^2} = \\ &= -\frac{(a^4t^2-1+a^2t^2)-2ia^2t\sqrt{1-a^2t^2}}{a^4t^2-1+a^2t^2} - \\ &= -\frac{a^2t}{\sqrt{1-a^2t^2}} \cdot \frac{(t\sqrt{1-a^2t^2}+a^2t\sqrt{1-a^2t^2}+i(2a^2t^2-1))}{a^4t^2-1+a^2t^2} - \\ &= \frac{a^2(t^2+1-a^2t^2)(a^4t^2-1+a^2t^2-2ia^2t\sqrt{1-a^2t^2})}{(a^4t^2-1+a^2t^2)^2+4a^4t^2(1-a^2t^2)} = B_1 + iB_2, \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned}
 B_1 &= -\frac{a_4}{a_7} - \frac{a^2 t^2 (1+a^2)}{a_7} - \frac{a^2 a_6 a_4}{a_4^2 + 4a_5^2} \\
 B_2 &= \frac{2a_5}{a_7} - \frac{a^2 t (2a^2 t^2 - 1)}{a_7 \sqrt{1 - a^2 t^2}} + \frac{a^2 (t^2 + 1 - a^2 t^2) 2a_5}{a_4^2 + 4a_5^2} \\
 a_4 &= a^4 t^2 - 1 + a^2 t^2 \\
 a_5 &= a^2 t \sqrt{1 - a^2 t^2} \\
 a_6 &= (1 - a^2) t^2 + 1 \\
 a_7 &= a^4 t^2 + 1 - a^2 t^2 \\
 (\dots)_w|_{|t| \leq \frac{1}{a}} &= \frac{(-i\sqrt{1 - a^2 t^2} + t) i\sqrt{1 - a^2 t^2}}{a^2 t + i\sqrt{1 - a^2 t^2}} = \\
 &= \frac{(1 - a^2 t^2 + it\sqrt{1 - a^2 t^2})(a^2 t - i\sqrt{1 - a^2 t^2})}{a^4 t^2 - 1 + a^2 t^2} = \\
 &= \frac{a^2 t (1 - a^2 t^2) + t (1 - a^2 t^2) + i (2a^2 t^2 - 1) \sqrt{1 - a^2 t^2}}{a_7} = \\
 &= S_1 + iS_2,
 \end{aligned} \tag{20}$$

где

$$\begin{aligned}
 S_1 &= -\frac{t (1 - a^2 t^2) (1 + a^2)}{a_7} \\
 S_2 &= \frac{(2a^2 t^2 - 1) \sqrt{1 - a^2 t^2}}{a_7}.
 \end{aligned}$$

Теперь выпишем выражение для функции  $\Psi(t)$  с подстановкой выражений из формулы (19):

$$\begin{aligned}
 \Psi(t)|_{|t| \leq \frac{1}{a}} &= \frac{\mu \cdot v_0}{\pi} \cdot \frac{2/a}{1/a^2 - t^2} - (B_1 + iB_2) \frac{\mu \cdot v_0}{\pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{2/a}{1/a^2 - t^2} + \\
 &+ (S_1 + iS_2) \frac{\mu \cdot v_0}{\pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{4t/a}{(1/a^2 - t^2)^2} = -a_1 v_0 (p_1 + ip_2),
 \end{aligned} \tag{21}$$

где

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \frac{-2a\varepsilon}{1 - a^2 t^2} + \frac{2aB_1}{1 - a^2 t^2} - \frac{4a^3 t S_1}{(1 - a^2 t^2)^2} \\
 p_2 &= \frac{2aB_2}{1 - a^2 t^2} - \frac{4a^3 t S_2}{(1 - a^2 t^2)^2}.
 \end{aligned}$$

Из второго уравнения в формуле (14) получаем после подстановок из формул (17), (18) и (21):

$$\begin{aligned}
 \sigma_\eta - \sigma_\xi + 2i\tau_{\xi\eta} &= 2 \left\{ (r_1 + ir_2) a_1 v_0 \cdot \frac{4a^3 t}{(1 - a^2 t^2)^2} - \right. \\
 &\left. - (q_1 + iq_2) a_1 v_0 (p_1 + ip_2) \right\}.
 \end{aligned} \tag{22}$$

Откуда получаем, разделяя действительные и мнимые части, два уравнения:

$$\sigma_\eta - \sigma_\xi = -2a_1 v_0 \left( \frac{-4a^3 t r_1}{(1 - a^2 t^2)^2} + q_1 p_1 - q_2 p_2 \right); \tag{23}$$

$$\tau_{\xi\eta} = -a_1 v_0 \left( \frac{-4a^3 t r_2}{(1 - a^2 t^2)^2} + q_1 p_2 + q_2 p_1 \right). \tag{24}$$

Решая совместно уравнения (16) и (23), получаем значения  $\sigma_\xi$  и  $\sigma_\eta$ , тангенциальные и нормальные к границе напряжения соответственно. По формуле (29) определяем касательные напряжения на контуре выреза.

Для определения сдвиговой осадки свай необходимо определить значения максимальных касательных напряжений, для этого необходимо перейти к главным напряжениям ( $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ):

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{\sigma_\xi + \sigma_\eta}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_\xi - \sigma_\eta)^2}{4} + \tau_{\xi\eta}^2} \\ \sigma_2 &= \frac{\sigma_\xi + \sigma_\eta}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma_\xi - \sigma_\eta)^2}{4} + \tau_{\xi\eta}^2} \\ \tau_{\max} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}.\end{aligned}\quad (25)$$

Значения нормальных напряжений  $\sigma_\eta$ , полученные по формулам (16) и (23), умноженные на коэффициент трения  $\mu$ , необходимо сравнить со значениями расчетных сопротивлений по боковой поверхности, приведённым в таблице 7.3 СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты». Значения следует определять отдельно для каждого инженерно-геологического элемента и наносить на расчетную схему (в общем виде приведена на рис. 2). Далее следует последовательно увеличивать осадку сваи вплоть до достижения момента, когда значения эпюры ( $\mu \cdot \sigma_\eta$ ) окажутся выше расчетных сопротивлений по всей длине боковой поверхности рассматриваемой сваи. Осадка сваи, соответствующая предельному равновесию теоретически полученных и предельно допустимых значений трения по боковой поверхности сваи, принимается за сдвиговую.

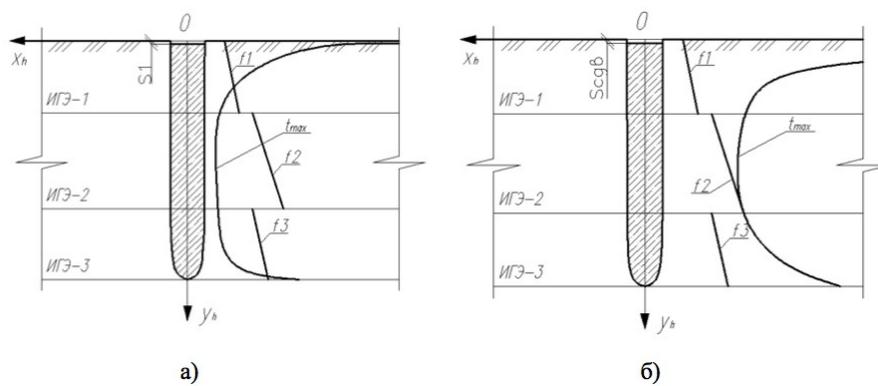


Рисунок 2 - Расчетная схема для определения сдвиговой осадки  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.1.2>

Примечание: а) в начале нагружения; б) при достижении сдвиговой осадки

В результате при расчете сдвиговой осадки можно также определять и последовательность достижения предельного сопротивления трению на участках боковой поверхности.

Предлагаемый метод использовался для расчета сдвиговой осадки буронабивных свай длиной 23,5 м и диаметром 0,63 м на площадке строительства многоэтажного жилого дома по ул. Таврической в г. Сочи Краснодарского края. Грунтовые условия рассматриваемой площадки приведены в таблице 1. Приведем расчет сдвиговой осадки сваи № 2. Вначале необходимо построить эпюру распределения предельного сопротивления сваи по боковой поверхности. Для упрощения расчета все инженерно-геологические элементы располагаем горизонтально. Эпюра предельного сопротивления строится по таблице 7.3 СП «Свайные фундаменты».

Таблица 1 - Грунтовые условия опытной площадки по ул. Таврической в г. Сочи

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.1.3>

Характеристика	Значение для грунтов					
	ИГЭ 2. Суглинок тяжелый тугопластичной консистенции, непросадочный, незасоленный, ненабухающий	ИГЭ 3. Глина легкая тугопластичной консистенции, непросадочная, незасоленная, ненабухающая	ИГЭ 4. Песок средней крупности, насыщенный водой	ИГЭ 5. Галичнековский грунт с супесчаным пластичным заполнителем, неветрелый, очень прочный, насыщенный водой	ИГЭ 6. Супесь пластичная, непросадочная	ИГЭ 7. Глина тяжелая полутвердой консистенции, непросадочная, незасоленная, ненабухающая
Влажность в естественном состоянии, %	27,5	33,4	24,2	20,7	18,1	27,7
Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	1,93	1,96	1,84	2,3	2,16	2,05
Коэффициент пористости	0,78	0,9	0,91	-	0,45	0,7

Характеристика	Значение для грунтов					
	ИГЭ 2. Суглинок тяжелый тугопластичной консистенции, непросадочный, незасоленный, ненабухающий	ИГЭ 3. Глина легкая тугопластичной консистенции, непросадочная, незасоленная, ненабухающая	ИГЭ 4. Песок средней крупности, насыщенный водой	ИГЭ 5. Галичневый грунт с супесчаным пластичным заполнителем, неветрелый, очень прочный, насыщенный водой	ИГЭ 6. Супесь пластичная, непросадочная	ИГЭ 7. Глина тяжелая полутвердой консистенции, непросадочная, незасоленная, ненабухающая
Показатель текучести	0,31	0,32	-	0,5	0,5	0,11
Угол внутреннего трения, град	18	17	35	27	21	20
Удельное сцепление, кПа	22	38	1	3	19	60
Модуль деформации, МПа	6,7	4,6	32	35,6	10,1	9,8

*Примечание: источник [12]*

С учетом полученных значений эпюры сопротивления по боковой поверхности выполняется расчет максимальных касательных напряжений с заданными перемещениями. Для расчета используются средневзвешенные по длине сваи значения модуля деформации и коэффициента Пуассона грунтов основания. При расчете данных характеристик на площадке по ул. Виноградной средневзвешенное значение модуля деформации составило 18,04 МПа, коэффициента Пуассона 0,29. Первоначальные характеристики грунтов площадки приведены в Приложении. Перемещения сваи увеличиваются вплоть до превышения всех точек эпюры ( $\mu \cdot \sigma_{\eta}$ ) относительно эпюры распределения значений трения по боковой поверхности  $f_i$ . Точность расчета обеспечивается необходимым числом итераций. На рисунке 3 приведены эпюры распределения максимальных касательных напряжений при разной (в т. ч. сдвиговой) осадке. Полученное в расчете значение сдвиговой осадки составило 1,55 мм.

Для верификации полученного результата был использован графоаналитический метод, предложенный Б.И. Далматовым [2]. Результаты статических испытаний сваи № 2 (рис. 4а) были преобразованы в логарифмической шкале для нахождения точки пересечения двух прямых, характеризующих работу сваи до и после сдвиговой осадки (рис. 4б). Осадка сваи, соответствующая точке пересечения двух прямых, является сдвиговой и составляет в данном случае 1,39 мм.

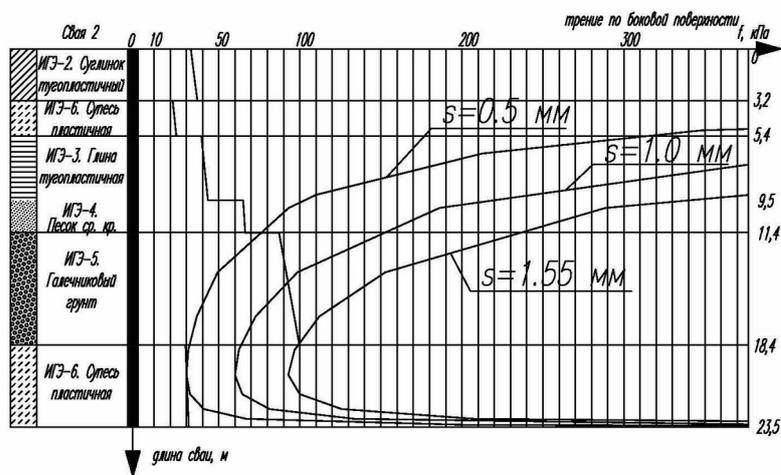


Рисунок 3 - Расчет сдвиговой осадки сваи  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.1.4>

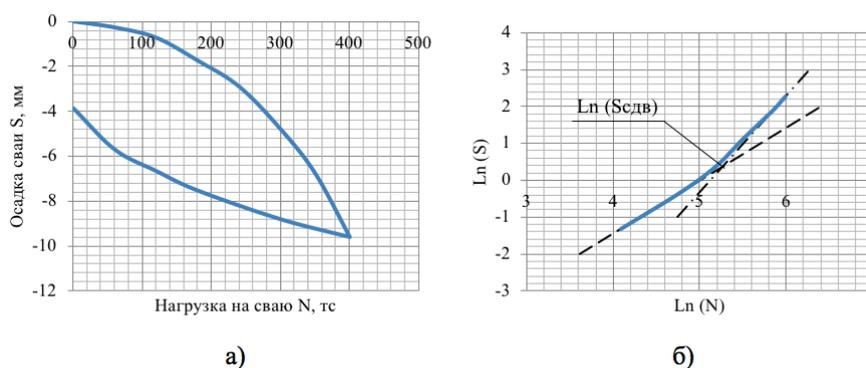


Рисунок 4 - Зависимость осадки сваи от приложенной нагрузки  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.1.5>

Примечание: а) исходная зависимость; б) в логарифмической шкале

**Заключение**

Разработан метод, позволяющий оценивать значения сдвиговой осадки сваи в процессе ее нагружения. Расхождение полученного аналитически значения сдвиговой осадки сваи с установленным в ходе статических испытаний составило 0,16 мм, что позволяет говорить об удовлетворительной сходимости результатов.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Гарькин И.Н., ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)», Пенза, Российская Федерация  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.1.6>

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

Garkin I.N., Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State University of Technology and Management named after. K.G. Razumovsky (First Cossack University)", Penza, Russian Federation  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.57.1.6>

**Список литературы / References**

1. Далматов Б.И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б.И. Далматов, Ф.К. Лапшин, Ю.В. Россихин. — Ленинград : Стройиздат, 1975. — 240 с.
2. Нгуен Занг Нам. Взаимодействие буронабивных длинных свай с грунтовым основанием с учетом фактора времени : дис. канд. техн. наук : 05.23.02 / Нгуен Занг Нам. — Москва, 2007. — 24 с.
3. Полищук А.И. Инженерный метод расчета осадки винтовой двухлопастной сваи в глинистом грунте / А.И. Полищук, Ф.А. Максимов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2017. — № 6. — С. 9–14. — EDN YOCDEV.
4. Степанов М.А. Взаимодействие комбинированных ленточных свайных фундаментов с предварительно опрессованным грунтовым основанием : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.02 / М.А. Степанов. — Тюмень : Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. — 24 с.
5. Ляшенко П.А. Оценка изменения деформационных характеристик глинистых грунтов в основании буронабивных свай при повторном нагружении / П.А. Ляшенко, О.А. Шмидт, Д.В. Гохаев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. — 2016. — Т. 7. — № 4. — С. 123–132. — DOI: 10.15593/2224-9826/2016.4.012. — EDN XHOMVN.
6. Далматов Б.И. Несущая способность висячих свай в грунтовых условиях Ленинграда / Б.И. Далматов, Ф.К. Лапшин // Сборник «Несущая способность свай в слабых грунтах». — Ленинград : ЛДНТП, 1966. — Ч. 2. — С. 3–12.
7. Бахолдин Б.В. Особенности расчета осадок фундаментов из буронабивных свай / Б.В. Бахолдин, П.И. Ястребов, Е.А. Парфенов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2007. — № 6. — С. 12–16. — EDN SLBARR.
8. Федоровский В.Г. Сваи в гидротехническом строительстве / В.Г. Федоровский, С.Н. Левачев, С.В. Курило [и др.]. — Москва : АСВ, 2003. — 240 с. — EDN QNKHAN.
9. Глазачев А.О. Исследование взаимодействия вертикально нагруженных буронабивных свай с основанием и их расчет с использованием статического зондирования : дис. ... канд. техн. наук / А.О. Глазачев. — Пермь, 2014. — 189 с. — EDN ADAKGX.
10. Лаврик В.И. Справочник по конформным отображениям / В.И. Лаврик, В.Н. Савенков. — Киев : Наукова думка, 1970. — 252 с.
11. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мусхелишвили. — Москва : Издательство АН СССР, 1954. — 647 с.
12. Технический отчет о статических испытаниях буроинъекционных свай на объекте: «Многоквартирные жилые дома для размещения временного персонала, волонтеров и сил безопасности, привлекаемых на период проведения XXII зимних олимпийских игр и XI паралимпийских зимних игр 2014 г. в г. Сочи (проектные и изыскательские работы, строительство)» площадка № 2. Жилой квартал в селе Веселое Адлерского района города Сочи по ул. Таврическая – Акаций. — Сочи : ООО «Гидротехника», 2012. — 29 с.
13. Ляшенко П.А. Анализ результатов статических испытаний буроинъекционных свай, выполненных в различных грунтовых условиях Краснодарского края / П.А. Ляшенко, И.М. Обухов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. — 2009. — № 21. — С. 153–156. — EDN RDJHML.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Dalmatov B.I. Proektirovanie svajnyh fundamentov v usloviyah slabych gruntov [Design of piled foundations in weak soils] / B.I. Dalmatov, F.K. Lapshin, Yu.V. Rossihin. — Leningrad : Strojizdat, 1975. — 240 p. [in Russian]
2. Nguyen Zang Nam. Vzaimodeystvie buronabivnyh dlinnyh svay s gruntovym osnovaniem s uchetom faktora vremeni [The interaction of boring long piles with a soil base, taking into account the time factor] : dis. ... of PhD in Engineering : 05.23.02 / Nguyen Zang Nam. — Moscow, 2007. — 24 p. [in Russian]
3. Polishhuk A.I. Inzhenernyj metod rascheta osadki vintovoj dvuhlopastnoj svai v glinistom grunte [Engineering Method of Calculating the Settlement of Two-Bladed Screw Pile in Clayey Soil] / A.I. Polishchuk, F.A. Maksimov // Osnovaniya, fundamenti i mehanika gruntov [Grounds, Foundations and Mechanics of Soils]. — 2017. — № 6. — P. 9–14. — EDN YOCDEV. [in Russian]
4. Stepanov M.A. Vzaimodeystvie kombinirovannyh lentochnyh svaynyh fundamentov s predvaritel'no opressovannym gruntovym osnovaniem [Interaction of combined strip pile foundations with pre-stressed soil beds] : abst. of dis. ... of PhD in Engineering: 05.23.02 / M.A. Stepanov. — Tyumen : Tyumen State University of Architecture, Building and Civil Engineering, 2015. — 24 p. [in Russian]

5. Lyashenko P.A. Ocenka izmeneniya deformacionnykh karakteristik glinistyykh gruntov v osnovanii buronabivnykh svay pri povtornom nagruzhении [Estimation of changes in the deformation characteristics of clay soils in the bottom of bored piles under repeated loading] / P.A. Lyashenko, O.A. Shmidt, D.V. Gokhaev // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura [PNRPU Bulletin. Construction and Architecture]. — 2016. — Vol. 7. — № 4. — P. 123–132. — DOI: 10.15593/2224-9826/2016.4.012. — EDN XHOMVH. [in Russian]
6. Dalmatov B.I. Nesushchaya sposobnost' visyachih svay v gruntovykh usloviyakh Leningrada [Bearing capacity of hanging piles in the soil conditions of Leningrad] / B.I. Dalmatov, F.K. Lapshin // Sbornik "Nesushhaya sposobnost' svay v slabyykh gruntah" [Collection "Bearing capacity of piles in weak soils"]. — Leningrad : LDNTP, 1966. — Part 2. — P. 3–12. [in Russian]
7. Baholdin B.V. Osobennosti rascheta osadok fundamentov iz buronabivnykh svay [Peculiarities in settlement calculations for foundations formed from cast-in-place piles] / B.V. Bakholdin, P.I. Yastrebov, E.A. Parfenov // Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov [Grounds, Foundations and Mechanics of Soils]. — 2007. — № 6. — P. 12–16. — EDN SLBARR. [in Russian]
8. Fedorovsky V.G. Svai v gidrotehnicheskoy stroitel'stve [Piles in Hydrotechnical Engineering] / V.G. Fedorovsky, S.N. Levachev, S.V. Kurillo [et al.]. — Moscow : ACB, 2003. — 240 p. — EDN QNKHAN. [in Russian]
9. Glazachev A.O. Issledovanie vzaimodeystviya vertikal'no nagruzhennykh buronabivnykh svay s osnovaniem i ih raschet s ispol'zovaniem staticheskogo zondirovaniya [Investigation of the interaction of vertically loaded boring piles with the base and their calculation using static sensing] : dis. ... of PhD in Engineering / A.O. Glazachev. — Perm, 2014. — 189 c. — EDN ADAKGX. [in Russian]
10. Lavrik V.I. Spravochnik po konformnym otobrazheniyam [Handbook of conformal maps] / V.I. Lavrik, V.N. Savenkov. — Kyiv : Naukova dumka, 1970. — 252 p. [in Russian]
11. Mushelishvili N.I. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti [Some basic problems of the mathematical theory of elasticity]. — Moscow : Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1954. — 647 p. [in Russian]
12. Tehnicheskyy otchet o staticheskikh ispytaniyakh buroin'ekcionnykh svay na ob'ekte: "Mnogokvartirnyye zhilye doma dlya razmeshcheniya vremennogo personala, volonterov i sil bezopasnosti, privlekaemykh na period provedeniya XXII zimnih olimpiyskikh igr i XI paralimpiyskikh zimnih igr 2014 g. v g. Sochi (proektnye i izyskatel'skie raboty, stroitel'stvo)" ploshchadka № 2. Zhiloy kvartal v sele Veseloe Adlerskogo rayona goroda Sochi po ul. Tavricheskaya – Akaciy [Technical report on static tests of drilling piles at the facility: "Multi-apartment residential buildings for temporary staff, volunteers and security forces involved in the period of the XXII Winter Olympic Games and XI Paralympic Winter Games 2014 in Sochi (design and survey work, construction)" site № 2. Residential area in the village of Veseloe, Adler district of Sochi, on Tavrichesky – Acacia Street]. — Sochi : LLC "Gidrotehnika", 2012. — 29 p. [in Russian]
13. Lyashenko P.A. Analiz rezul'tatov staticheskikh ispytaniy buroin'ekcionnykh svay, vypolnennykh v razlichnykh gruntovykh usloviyakh Krasnodarskogo kraya [Analysis of the results of static tests of boroinjection piles performed in various soil conditions of the Krasnodar Territory] / P.A. Lyashenko, I.M. Obuhov // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Proceedings of the Kuban State Agrarian University]. — 2009. — № 21. — P. 153–156. — EDN RDJHML. [in Russian]