

DOI: 10.15593/2224-9826/2024.3.04

УДК 624.139

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСАДКИ ОДИНОЧНОЙ СВАИ В ТЕРМОСТАБИЛИЗИРУЕМОМ ОСНОВАНИИ, СЛОЖЕННОМ ОТТАЯВШИМИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ

Е.А. Жайсамбаев¹, Т.В. Мальцева¹, А.Н. Краев¹, А.И. Синицкий²

¹Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

²Научный центр изучения Арктики, Салехард, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 25 мая 2024
Одобрена: 10 июля 2024
Принята к публикации:
27 сентября 2024

Ключевые слова:

одиночная железобетонная свая, свайные фундаменты, грунтовое основание, несущая способность одиночной сваи, оттаявший многолетнемерзлый грунт, термостабилизация основания, осадка одиночной сваи, метод Власова, уравнение работ, расчетная и конструктивная схемы, ледогрунтовое уширение.

АННОТАЦИЯ

Строительство капитальных объектов на территориях Крайнего Севера чаще всего осуществляют по I принципу проектирования. Однако при строительстве линейно-протяженных объектов встречаются локальные зоны, сложенные оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами, на которых не обеспечена требуемая проектом несущая способность свай. Локальные оттаявшие зоны образованы вследствие природных процессов либо техногенных явлений. Для обеспечения надежной работы свайного фундамента применены сезонно действующие охлаждающие устройства, обеспечивающие локальное промораживание околосвайного грунта. Согласно анализу работ Л.Л. Васильева, С.Л. Вааза, С.С. Вялова, В.И. Макарова понижение температуры грунтового основания с $-0,3$ до $-1,0$ °С позволяет повысить несущую способность свайного фундамента в 2,5 раза, так как прочность мерзлых грунтов в большей степени зависит от температуры, чем от литологического состава.

В результате проведенных численных, маломасштабных и натурных экспериментов по термостабилизации оттаявшего многолетнемерзлого грунтового основания с одиночной сваей установлено, что у боковой поверхности сваи формируется ядро мерзлого грунта, форма и геометрические параметры которого также определены. Несущая способность сваи возрастает вследствие увеличения контактной рабочей поверхности за счет формирования мерзлого грунтового уширения.

Разработана аналитическая методика расчета осадки одиночной сваи с ледогрунтовым уширением, основанная на методе В.З. Власова применительно к упругому основанию. Представлен пример расчета одиночной сваи в термостабилизируемом оттаявшем основании. Предлагаемая методика верифицируется по данным результатов натурных экспериментальных исследований, проводимых на экспериментальной площадке, расположенной в Ямало-Ненецком автономном округе.

© Жайсамбаев Ерkn Аскерович – аспирант, ассистент, e-mail: zhaysambaeverk@mail.ru.

Мальцева Татьяна Владимировна – доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: maltsevatv@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0002-0274-0673.

Краев Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: kraev_aln@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2316-246X.

Синицкий Антон Иванович – кандидат геолого-минералогических наук, e-mail: AISinitskii@yanao.ru.

Erkn A. Zhaysambayev – Postgraduate Student, Assistant, e-mail: zhaysambaeverk@mail.ru.

Tatyana V. Maltseva – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: maltsevatv@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0002-0274-0673.

Aleksey N. Kraev – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: kraev_aln@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2316-246X.

Anton I. Sinitskii – Ph. D. in Geological and Mineralogical Sciences, e-mail: AISinitskii@yanao.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

METHODOLOGY DETERMINATION OF SETTLEMENT OF A SINGLE PILE IN A THERMOSTABILIZED BASEMENT COMPOSED OF THAWED PERMAFROST SOILS THAWED PERMAFROST SOILS

E.A. Zhaisambayev¹, T.V. Maltseva¹, A.N. Kraev¹, A.I. Sinitsky²

¹Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

²Scientific Center for Arctic Research, Salekhard, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 25 May 2024
Approved: 10 July 2024
Accepted for publication:
27 September 2024

Keywords:

single reinforced concrete pile, pile foundations, soil foundation, bearing capacity of a single pile, thawed permafrost soil, thermal stabilization of the foundation, settlement of a single pile, Vlasov method, equation of works, design and construction schemes, ice-soil widening.

ABSTRACT

Construction of capital facilities in the territories of the Far North is most often carried out according to the I design principle. However, during the construction of linear and long-distance facilities there are localized zones composed of thawed permafrost soils, where the pile bearing capacity required by the project is not ensured. Local thawed zones are formed due to natural processes or man-made phenomena. In order to ensure reliable operation of the pile foundation, seasonal cooling devices are used to ensure local freezing of the pile soil. According to the analysis of works by L.L. Vasiliev, S.L. Vaaz, S.S. Vyalov, V.I. Makarov, lowering the temperature of the soil foundation from -0.3 to -1.0 °C allows increasing the bearing capacity of the pile foundation by 2.5 times, since the strength of frozen soils depends more on the temperature than on the lithological composition.

As a result of numerical, small-scale and field experiments on thermal stabilization of thawed perennially frozen ground with a single pile, it was established that a frozen soil core is formed near the lateral surface of the pile, the shape and geometric parameters of which are also determined. The bearing capacity of the pile increases due to the increase of the contact working surface due to the formation of frozen ground widening.

An analytical method for calculating the settlement of a single pile with an ice-loaded widening, based on the method of V.Z. Vlasov for an elastic foundation, is developed. An example of calculation of a single pile in a thermostabilized thawed foundation is presented. The proposed methodology is verified based on the results of field experimental studies conducted at an experimental site located in the Yamalo-Nenets Autonomous District.

Введение

Надежная работа свайных фундаментов линейно-протяженных объектов в районах Крайнего Севера затруднена на территориях, представленных локально оттаявшими и оттаивающими многолетнемерзлыми грунтами [1–4]. Для обеспечения требуемой несущей способности свайных фундаментов и температурного режима основания были локально использованы сезонно действующие охлаждающие устройства. Для оценки безопасности эксплуатации фундаментов актуальной задачей является определение несущей способности и осадки сваи в заданных инженерно-геокриологических условиях.

При расчёте свайных фундаментов несущую способность сваи определяют по методике свода правил СП 24.13330.2021, или по СП 25.13330.2020, или по данным статического зондирования, или полевыми испытаниями согласно нормативной документации. Однако результаты расчётов по определению несущей способности и осадки сваи по существующему нормативному методу разнятся с данными натурных полевых испытаний. Применение нормативной методики целесообразно в стандартных инженерно-геологических условиях. В нормативной литературе не предлагается методики расчета несущей способности и осадки одиночной сваи в термостабилизируемом основании с ледогрунтовым уширением. В результате выполненных расчетов и сопоставлений, по мнению авторов [4–7], фактическая несущая способность нередко превосходит величину, рассчитанную по нормативным документам. Основными факторами расхождения являются недостаток эксперименталь-

ных исследований и отсутствие актуализированной методики расчёта, учитывающей ряд факторов: механические свойства грунтов в формируемом ледогрунтовым массиве и на контакте «талый – мерзлый грунт», напряженно-деформированное состояние грунтового массива, гидрогеологические условия и т.п.

Анализ научной литературы позволил отметить ряд авторов, предлагающих разные подходы и методики расчета по определению несущей способности и осадки одиночной сваи.

Огромный вклад в развитие свайного фундаментостроения внес А.А. Бартоломей. Под его руководством проведены экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия свай и свайных фундаментов с окружающим грунтом; разработаны методы прогноза осадок и определения напряжений в активной зоне центрально и внецентренно нагруженных свайных фундаментов; проведена оценка несущей способности свайных фундаментов, исходя из предельно допустимых осадок зданий и сооружений и условий их нормальной эксплуатации, проведена оценка устойчивости свайных фундаментов на склонах; разработаны прогрессивные конструкции свай [8].

В работе Q.-J. Liu, J.-B. Wang, J.-J. Ma, W.-H. Gao предложена модель, позволяющая определять осадку сваи в слоистом грунтовым основании, тем самым учтена неоднородность грунтового основания [9].

В работе Y. Li, W. Li предложена аналитическая методика оценки несущей способности и осадки сваи конической формы [10].

G. Yu, W. Gong, G. Dai, Y. Luan предложили методику определения лобовой несущей способности в слабых грунтовых основаниях [11].

Z.-Q. Xia, J.-F. Zou предложили находить осадку сваи и свайного фундамента аналитическим методом, в котором перемещение сваи описывалось кусочно-непрерывной функцией. Сила трения по боковой поверхности нелинейно связана с перемещением. Проведено сравнение результатов натуральных испытаний с данными, полученными в результате численного расчёта [12].

M. Mert, M.T. Ozkan определили осадку вертикально нагруженных свай гиперболическим методом. В основу данного метода были заложены данные экспериментальных исследований по определению осадки свай различных диаметров [13].

Д.В. Прокопенко определил несущую способность винтовой металлической сваи при приложении равномерно распределенной нагрузки с учетом процесса уплотнения окружающих слоев грунта [14].

Z. Xu, Z. Guo, используя технологию «прозрачного грунта», проводили лабораторные эксперименты на моделях свай. Авторы получили характерные зависимости «осадка – нагрузка», диаграммы перемещений грунта вокруг сваи [15].

E. Nasrollahzadeh, N. Nataf численно и экспериментально определили несущую способность сваи и свайной группы конической и цилиндрической формы в песчаном грунтовым основании [16].

Н.Г. Каженцев, О.Ю. Ещенко провели численное моделирование в программном продукте Midas функции осадки конических и цилиндрических буроинъекционных свай в зависимости от прочностных свойств грунтового основания [17].

В.С. Глухов, О.В. Хрянина, М.В. Глухова предложили усовершенствованный метод расчета несущей способности свай в пробитых скважинах с уширением. Данный способ отражает реальные условия взаимодействия свай в пробитых скважинах с уширением и грунтового основания [18].

В.С. Глухов, М.В. Панкина предложили модернизированную методику определения осадки свай в пробитых скважинах. Авторы статьи ввели повышенный модуль деформации слоя грунта, создаваемого в процессе формирования уширения. Авторы предложили учитывать нелинейное поведение основания при вычислении осадки [19].

Таким образом, анализ существующих методик расчета несущей способности и осадки одиночной сваи показал, что в них не учтена особенность работы сваи с ледогрунтовым массивом, формируемым за счет работы сезонно действующих охлаждающих устройств в оттаявшем многолетнемерзлом грунтовым основании.

Целью исследования является разработка методики определения осадки одиночной сваи в термостабилизируемом основании, представленном оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами.

Материалы и методы

В результате проведенных численных, маломасштабных и натурных экспериментов [20, 21] установлено, что при термостабилизации оттаявшего и оттаивающего многолетнемерзлого основания сезонно действующими охлаждающими устройствами вокруг тела одиночной сваи формируется ядро мерзлого грунта, которое увеличивает несущую способность одиночной сваи за счет увеличения рабочей контактной поверхности сваи с грунтом. Конструктивная схема одиночной сваи с мерзлым ядром, построенная по результатам проведенных экспериментов, представлена на рис. 1, а. Приняли в качестве допущения, что одиночная свая с мерзлым ядром представлена в виде цилиндра, погруженного в оттаявшее многолетнемерзлое основание. Замена формы эллипсоида мерзлого ядра на эквивалентный цилиндр проведена на основе равенства объемов двух фигур. На основе вышеописанного допущения построена расчетная схема сваи, представленная на рис. 1, б.

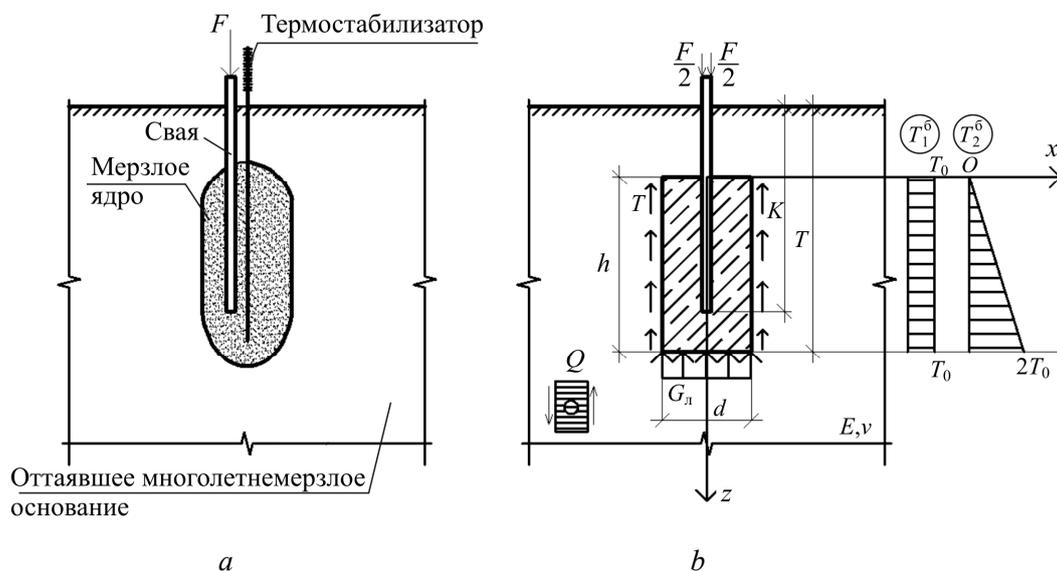


Рис. 1. Схемы сваи в термостабилизируемом основании: а – конструктивная; б – расчётная; h – высота цилиндра; d – диаметр цилиндра; K – глубина погружения сваи, T – расстояние от дневной поверхности грунта до нижней точки цилиндра
 Fig. 1. Schemes of the pile in the thermostabilized base: а – constructive; б – design; h – height of the cylinder; d – diameter of the cylinder; K – depth of pile immersion, T – distance from the day surface of the ground to the bottom point of the cylinder

По методу Власова рассмотрена модель упругого основания, в которой сказано о малости (на порядок) горизонтальных перемещений по сравнению с вертикальными. Вертикальные перемещения частиц грунта представлены в виде произведения двух функций $w(x, z) = W(x) \cdot \psi(z)$, предложено дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами [8]:

$$2t \cdot W''(x) - k \cdot W(x) + q(x) = 0, \quad (1)$$

где $k = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \int_0^H [\psi'(z)]^2 \cdot dz = B \cdot s_1$ [МН];

$$2t = \frac{E}{2(1+\nu)} \int_0^H \psi^2(z) \cdot dz = A \cdot r_1$$
 [МН · м²].

общее решение, которого имеет вид:

$$W(x) = C \cdot e^{-\alpha x}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{k}{2t}} \left[\frac{1}{\text{м}} \right]. \quad (2)$$

Безразмерная нормированная функция $\psi(z)$ задана, ее общий вид изображён на рис. 2, а, в частности $\psi(z)$ можно принять линейной функцией $\psi(z) = \frac{H-z}{H}$, искомой величиной является $W(x)$, м.

В упругое основание в виде прямоугольной пластины толщиной $\delta = 1$ м погружена одиночная свая цилиндрической формы, нагруженная нагрузкой F , МН (см. рис. 1, а), которую разложили по принципу симметрии на две $F/2$ (см. рис. 1, б). Нагрузку $F/2$ распределили между боковой (F_6) и лобовой ($F_л$) поверхностями:

$$\frac{F}{2} = \frac{1}{2}(F_6 + F_л). \quad (3)$$

Взаимодействие сваи с грунтовым основанием определено касательными напряжениями по боковой поверхности сваи, которые распределены равномерно по боковой поверхности: $\tau_1^6 = -\tau_0 / 2$ (см. рис. 1, б) либо по линейному закону: $\tau_2^6 = -\tau_0 \cdot z / h_{\text{св}}$ (см. рис. 1, б). Знак «минус» указывает на направление действия поперечной силы. Трение по боковой поверхности выше уширения сваи не учитывается.

К нижнему концу сваи приложена сила $F_л$ (для полупространства – полосовая нагрузка, см. рис. 2, а), от действия которой полученное решение является фундаментальным, и на его основе получено решение для нормальных напряжений $\sigma_л = -F_л / A_{\text{усл}}$, приложенных к площади условного фундамента $A_{\text{усл}} = \pi r^2$ (рис. 1, б, r – радиус цилиндра).

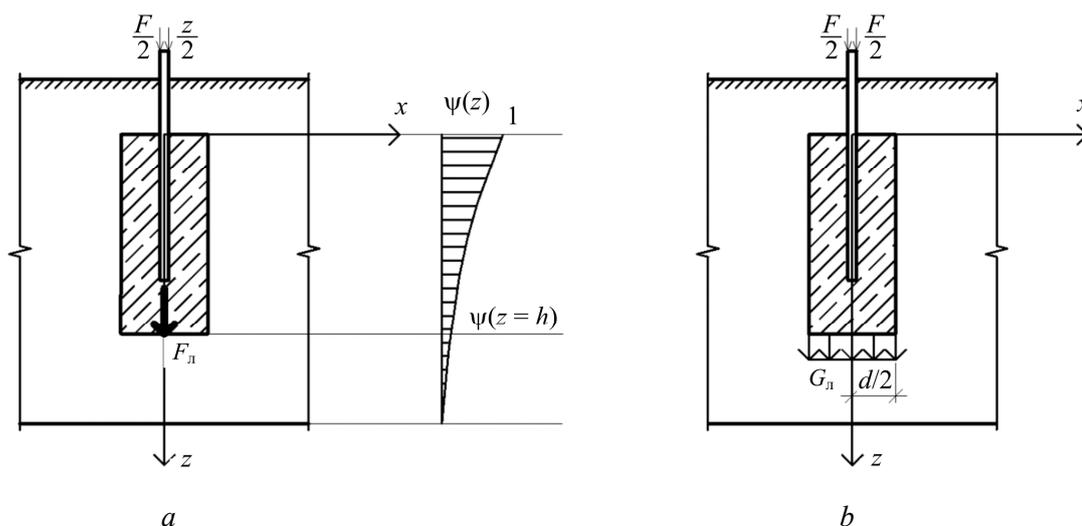


Рис. 2. Лобовое сопротивление на нижнем конце сваи: *a* – в виде сосредоточенной силы; *b* – в виде нормальных напряжений

Fig. 2. Frontal resistance at the bottom end of the pile: *a* – in the form of concentrated force; *b* – in the form of normal stresses

Результаты

Для использования принципа возможных перемещений авторами статьи введены работы внешних и внутренних сил.

Работа внешних сил $S^{\text{в}}$ взаимодействия сваи с грунтом на возможных перемещениях $\psi(z)$:

$$S_1^{\text{в}} = -\tau_0 \cdot a_{11}, \quad \text{где } a_{11} = \frac{1}{2} \int_0^{h_{\text{св}}} \psi(z) \cdot dz; \quad (4)$$

$$S_2^{\text{в}} = -\tau_0 \cdot b_{11}, \quad \text{где } b_{11} = \frac{1}{h_{\text{св}}} \int_0^{h_{\text{св}}} z \cdot \psi(z) \cdot dz. \quad (5)$$

Индекс «1» соответствует равномерному распределению, а индекс «2» – линейному распределению (рис. 1, *b*).

Работы внешних сил F_n и σ_n , приходящихся на пяту сваи, записаны с использованием общего решения (1). Постоянная C определена из равенства работ внешних и внутренних сил на возможных перемещениях в точке $(x=0, z=h_{\text{св}})$. Приведем выражение для работы внешней силы в виде полосовой нагрузки $S_1^{\text{н}}$:

$$S_1^{\text{н}} = -\frac{F_n}{2} \cdot \psi(z=h_{\text{св}}). \quad (6)$$

Работа внутренних сил, действующих на грани положительной полуплоскости OZY , равна:

$$S(x=0) = \int_0^H \tau_{zx} \cdot \psi(z) dz = \frac{E}{2(1+\nu)} W'(x=0) \int_0^H \psi^2(z) dz = 2t \cdot W'(x=0). \quad (7)$$

Из равенства работ получили фундаментальное решение для перемещений под действием $F_{л}$:

$$W(x) = C \cdot e^{-\alpha x} = \frac{F_{л} \cdot \delta \cdot \psi(z = h_{св})}{4t\alpha} \cdot e^{-\alpha x}. \quad (8)$$

На основе этого выражения построили решение для распределенной нагрузки $\sigma_{л}(\xi)$. В формуле (8) для постоянной C вместо $F_{л}/2$ ввели замену $\sigma_{л}(\xi) \cdot d\xi$, $\xi \in \left[0; \frac{d}{2}\right]$, тогда выражение для перемещений запишется:

$$W(x) = \frac{\sigma_{л}(\xi) \cdot d\xi \cdot \delta \cdot \psi(z = h_{св})}{2t\alpha} \cdot e^{-\alpha(x-\xi)}. \quad (9)$$

Сдвиг $(x - \xi)$ по координате означает, что начало координат переносим в точку приложения силы.

Суммируя перемещения (9) на отрезке $0 \leq x \leq \frac{d}{2}$, окончательная формула для вертикальных перемещений грунта от нормальных напряжений, распределенных по лобовой поверхности, имеет вид:

$$W(x) = \frac{\psi(z = h_{св})}{2t \cdot \alpha} \cdot \sigma_{л} \cdot \left[\int_0^{\frac{d}{2}} e^{-\alpha(x-\xi)} \cdot d\xi \right] = \frac{\psi(z = h_{св})}{2t \cdot \alpha \cdot \alpha} \cdot \sigma_{л} \cdot \left[e^{-\alpha\left(x-\frac{d}{2}\right)} - e^{-\alpha x} \right] \cdot \delta, \quad (10)$$

$$2t \cdot \alpha^2 = k.$$

В отличие от формулы (6) для точки $x = \frac{d}{2}$ работу пяты цилиндрической сваи $S_2^л$ от распределенной на отрезке $\left[0; \frac{d}{2}\right]$ нагрузки записали упрощенно:

$$S_2^л = -\sigma_{л} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \psi(z = h_{св}) \cdot \left[1 - e^{-\alpha \frac{d}{2}} \right] \cdot \delta. \quad (11)$$

Сопоставляя формулы (6) и (11) для работ, видим, что множитель $\frac{1}{\alpha} \cdot \left[1 - e^{-\alpha \frac{d}{2}} \right]$ отличает действие распределенной нагрузки $\sigma_{л}$ от полосовой $F_{л}$. В дальнейшем приведены все формулы для лобового сопротивления $\sigma_{л}$.

Работу полной внешней силы, как сумму работ по боковой поверхности и пяте сваи, получили для равномерно распределенных касательных напряжений:

$$S_1 = - \left[\tau_0 \cdot a_{11} + \frac{F_{л}}{2} \cdot \psi(z = h_{св}) \right] \Rightarrow C_1, \quad a_{11} = \frac{1}{2} \int_0^{h_{св}} \psi(z) \cdot dz. \quad (12)$$

В случае треугольного распределения касательных напряжений по боковой поверхности получили:

$$S_2 = - \left[\tau_0 \cdot b_{11} + \frac{F_{II}}{2k} \cdot \psi(z = h_{CB}) \cdot \left\{ 1 - e^{-\frac{\alpha \cdot d}{2}} \right\} \right] \Rightarrow C_2, \quad b_{11} = \frac{1}{h_{CB}} \int_0^{h_{CB}} z \cdot \psi(z) \cdot dz. \quad (13)$$

Приравняли работу внешней и работу внутренней сил в начале координат $S(x=0) = 2t \cdot (-\alpha \cdot C) \cdot 1$ для определения C для двух вариантов распределения касательных напряжений:

$$C_i = - \frac{S_i(x=0)}{2t \cdot \alpha}, \quad i = 1; 2. \quad (14)$$

Постоянные C_1 и C_2 общего решения $W_i, i = 1; 2$ (1) для двух вариантов распределения касательных напряжений имеют вид:

$$C_1 = - \frac{1}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\tau_0 \cdot a_{11} + \frac{F_{II}}{2} \cdot \delta \cdot \psi(z = h_{CB}) \right]; \quad (15)$$

$$C_2 = - \frac{1}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\tau_0 \cdot b_{11} + \frac{F_{II}}{2} \cdot \delta \cdot \psi(z = h_{CB}) \cdot \left\{ 1 - e^{-\frac{\alpha \cdot d}{2}} \right\} \right]. \quad (16)$$

Тогда вертикальные перемещения $w_i(x, z) = W_i(x) \cdot \psi(z)$ частиц грунта определены выражениями:

$$w_1(x, z) = - \frac{1}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\tau_0 \cdot a_{11} + \frac{F_{II}}{2} \cdot \psi(z = h_{CB}) \right] \cdot e^{-\alpha x} \cdot \psi(z), \quad (17)$$

$$w_2(x, z) = - \frac{1}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\tau_0 \cdot b_{11} + \frac{1}{k} \cdot \frac{F_{II}}{2} \cdot \psi(z = h_{CB}) \cdot \left\{ 1 - e^{-\frac{\alpha \cdot d}{2}} \right\} \right] \cdot e^{-\alpha x} \cdot \psi(z). \quad (18)$$

Коэффициенты, вошедшие в формулы, представлены ниже:

$$\alpha = \sqrt{\frac{k}{2t}}, \quad \left[\frac{1}{M} \right] \quad 2t = A \cdot r_1 \quad [MN \cdot M^2]; \quad (19)$$

$$A = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad [MПа] \quad r_1 = \int_0^H [\psi(z)]^2 dz \quad [M^4]; \quad (20)$$

$$k = B(s_1 + s_2) + B \cdot s_1 \quad [MN]; \quad (21)$$

$$B = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad [MПа]; \quad (22)$$

$$s_1 = \int_0^H [\psi'(z)]^2 dz \quad [\text{M}^2]; \quad (23)$$

$$s_2 = \int_0^H \psi(z) \cdot \psi''(z) dz \quad [\text{M}^2]; \quad (24)$$

$$a_{11} = \frac{1}{2} \int_0^{h_{\text{св}}} \psi(z) dz \quad [\text{M}^3]; \quad (25)$$

$$b_{11} = \frac{1}{h_{\text{св}}} \int_0^{h_{\text{св}}} z \cdot \psi(z) dz \quad [\text{M}^3]. \quad (26)$$

Согласно требованиям второй группы предельных состояний по предельной осадке зададимся условием:

$$\Delta_1 \leq [\Delta], \quad (27)$$

где Δ_1 – осадка сваи в натуральных условиях; $[\Delta]$ – предельная осадка сваи.

Приведена формула для определения осадки для случая равномерного распределения касательных напряжений по боковой поверхности сваи и равномерно распределенной нагрузки на нижнем конце сваи:

$$\Delta_{11} = -\frac{1}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\tau_0 \cdot a_{11} + \frac{F_{\text{л}}}{2} \cdot \psi(z = h_{\text{св}}) \right] \cdot \psi(0). \quad (28)$$

Соотношение между несущей способностью по боковой поверхности и пяте сваи ввели через коэффициент β :

$$F = (F_{\text{б}} + F_{\text{л}}) = F_{\text{л}} + (\beta \cdot F_{\text{л}}) = F_{\text{л}} + (1 + \beta), \quad (29)$$

где:

$$F_{\text{б}} = \beta \cdot F_{\text{л}}, \quad \beta > 0, \quad (30)$$

$$F_{\text{л}} = \frac{F}{(\beta + 1)}, \quad (31)$$

$$F_{\text{б}} = \frac{\beta \cdot F}{\beta + 1}. \quad (32)$$

Формула для определения осадки сваи с учетом (31) и (32):

$$\Delta_{11} = -\frac{F}{2t \cdot \alpha} \cdot \left[\frac{\beta}{(\beta + 1) \cdot A_{\text{св}}} \cdot a_{11} + \frac{1}{2 \cdot (\beta + 1)} \cdot \psi(z = h_{\text{св}}) \right] \cdot \psi(0). \quad (33)$$

На рис. 3 представлено сравнение значений осадки сваи, полученной в результате проведения натурных статических испытаний и вычисленной по предложенной аналитической методике, и согласно СП 25.13330.2020. Натурные испытания проводились на территории Ямало-ненецкого автономного округа (ЯНАО). Длина железобетонной сваи составила $l = 11$ м, поперечное сечение 30×30 см. С поверхности до глубины 20 м залегает суглинок текучепластичный, для которого $E = 7,8$ МПа, $\nu = 0,35$. В таблице представлены результаты определения несущей способности сваи.

Результаты определения несущей способности

Results of determination of bearing capacity

Метод интерпретации результатов испытаний сваи	F_u , кН
По результатам полевых статических испытаний	765
По предложенной аналитической методике	578
Расчетный метод определения по СП 25.13330.2020	765

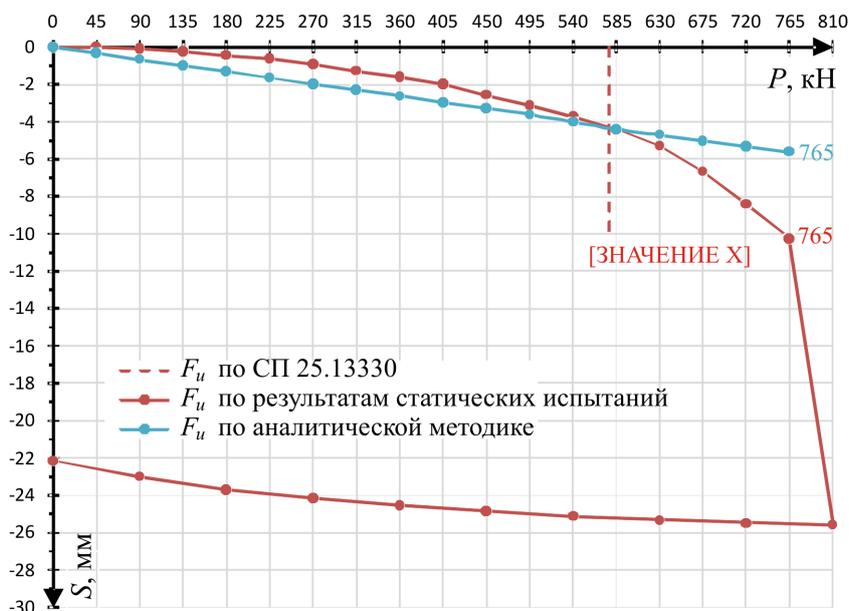


Рис. 3. Графики зависимости осадки сваи S от нагрузки P на конец первого цикла зимнего периода – 1 мая (F_u – частное значение предельного сопротивления сваи)

Fig. 3. Plots of pile settlement S versus load P at the end of the first winter cycle – May 1 (F_u is the partial value of the ultimate resistance of the pile)

Выводы

Подводя итоги проведенных научных исследований, можно сделать следующие основные выводы:

1. На основе проведенных исследований предложена конструктивная и расчетная схемы сваи с увеличенной контактной рабочей поверхностью в термостабилизируемом основании, представленном оттаявшими и оттаивающими многолетнемерзлыми грунтами.

2. Разработан аналитический метод расчёта осадки одиночной сваи в термостабилизируемом основании, в которой получена аналитическая зависимость осадка – несущая способность. Разработанный метод может быть использован при оценке надежности системы «основание – капитальное сооружение», а также для количественной оценки безопасности возведения и эксплуатации свайных фундаментов на территориях распространения локально оттаявших многолетнемерзлых грунтов.

3. Предложенная аналитическая методика верифицируется и совершенствуется по данным натурных полевых исследований, проводимых на экспериментальной площадке в ЯНАО.

Финансирование. Выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-29-00118.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Библиографический список

1. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team. Eds R.K. Pachauri and L.A. Meyer. – IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. – 151 p.
2. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: press release. – Geneva: IPCC Secretariat, 2019.
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет, 2014. – 1007 с.
4. Никифорова, Н.С. Несущая способность свай в многолетнемерзлых грунтах при изменении климата / Н.С. Никифорова, А.В. Коннов // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 14–24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02
5. Долматов, Б.И. Особенности работы свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б.И. Долматов. – М.: Трест «Оргсельстрой», 1966. – 6 с.
6. Глотов, Н.М. Свайные фундаменты / Н.М. Глотов, А.А. Луга, К.С. Силин. – М.: Транспорт, 1975. – 432 с.
7. Долматов, Б.И. Оценка несущей способности свай при массовом их применении / Б.И. Долматов, Ф.К. Лапшин // Сопровождение-семинар по обмену опытом проектирования и воздействия свайных фундаментов. – М., 1966. – С. 2–6.
8. Бартоломей, А.А. Прогноз осадок свайных фундаментов / А.А. Бартоломей, И.М. Омельчак, Б.С. Юшков. – М.: Стройиздат, 1994. – 384 с.
9. Vertically-loaded single floating pile in layered soils by thin annulus element method / Q.-J. Liu, J.-B. Wang, J.-J. Ma, W.-H. Gao // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. – 2019. – Vol. 41, iss. 4. – P. 748–754. DOI: 10.11779/CJGE201904019
10. Li, Y. Load-displacement behaviour of tapered piles: theoretical modelling and analysis / Y. Li, W. Li // Geomechanics and Engineering. – 2021. – Vol. 26, iss. 1. – P. 1–11. DOI: 10.12989/gae.2021.26.1.001
11. Calculation of dragload of single pile in soft soil considering consolidation and rheology / G.Yu, W. Gong, G. Dai, Y. Luan // Journal of Southeast University (Natural Science Edition). – 2020. – Vol. 50, iss. 4. – P. 606–615. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2020.04.002

12. Xia, Z.-Q. Simplified approach for settlement analysis of vertically loaded pile / Z.-Q. Xia, J.-F. Zou // *Journal of Engineering Mechanics*. – 2017. – Vol. 143, iss. 11. – № 04017124. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001334
13. Mert, M. A new hyperbolic variation method for settlement analysis of axially loaded single friction piles / M. Mert, M.T. Ozkan // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2020. – Vol. 13, iss. 16. – № 794. DOI: 10.1007/s12517-020-05791-z
14. Прокопенко, Д.В. Математическое и компьютерное моделирование несущей способности одиночной винтовой сваи с учетом уплотнения грунта / Д.В. Прокопенко // *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*. – 2013. – Т. 4, № 55. – С. 25–28.
15. Xu, Z. Experimental study on bearing characteristics and soil deformation of necking pile with cap using transparent soils technology / Z. Xu, Z. Guo // *Advances in Civil Engineering*. – 2021. – Vol. 2021, № 6625556. DOI: 10.1155/2021/6625556
16. Nasrollahzadeh, E. Experimental and numerical study on the bearing capacity single and groups of tapered and cylindrical piles in sand / E. Nasrollahzadeh, N. Hataf // *International Journal of Geotechnical Engineering*. – 2019. DOI: 10.1080/19386362.2019.1651042
17. Каженцев, Н.Г. Влияние физико-механических свойств грунта основания на осадку одиночных буройнъекционных конических свай в глинистых грунтах / Н.Г. Каженцев, О.Ю. Ещенко // *Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сб. ст. по материалам IX Всерос. конф. молодых ученых*. – Кубань, 2016. – С. 795–796.
18. Глухов, В.С. Исследование влияния уширения фундаментов в вытрамбованных котлованах на осадку [Электронный ресурс] / В.С. Глухов, О.В. Хрянина, М.В. Глухова // *Современные научные исследования и инновации*. – 2015. – № 4. – Ч. 1. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/04/51435> (дата обращения: 08.10.2022).
19. Глухов, В.С. Нелинейные деформации уплотненного грунтового основания под уширением свай в пробитых скважинах / В.С. Глухов, М.В. Панкина // *Construction and Geotechnics*. – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 19–28. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.02
20. Жайсамбаев, Е.А. Расчет температурного режима термостабилизируемого основания с одиночной свайей / Е.А. Жайсамбаев, Т.В. Мальцева, А.Н. Краев // *Construction and Geotechnics*. – 2023. – Т. 14, № 4. – С. 5–18. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.4.01
21. Экспериментальный стенд для исследования процессов промерзания-оттаивания грунтов основания в лабораторных условиях / Е.А. Жайсамбаев, А.Н. Краев, А.Н. Краев, В.В. Воронцов // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. – 2020. – № 1. – URL: <https://t-s.today/PDF/16SATs120.pdf> (дата обращения: 08.10.2022). DOI: 10.15862/16SATs120

References

1. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team. Eds R.K. Pachauri and L.A. Meyer. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014, 151 p.
2. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: press release. Geneva, IPCC Secretariat, 2019.
3. Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Moscow, Roshydromet, 2014, 1007 p.

4. Nikiforova N.S.; Konnov A.V. Piles bearing capacity in permafrost soils under climate change. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 3, pp. 14-24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02
5. Dolmatov B.I. Osobennosti raboty svaynykh fundamentov v usloviyakh slabykh gruntov [Features of pile foundations in conditions of weak soils]. Moscow, Orgselstroy, 1966, 6 p.
6. Glotov N.M., Luga A.A., Silin K.S., Zavriev K.S. Svaayne fundamenty [Pile foundations]. Moscow, Transport, 1975, 432 p.
7. Dolmatov B.I., Lapshin F.K. Otsenka nesushchey sposobnosti svay pri massovom ikh primenenii [Evaluation of the bearing capacity of piles for mass application]. *Soveshchanie-seminar po obmenu opytom proektirovaniya i vozdeystviya svaynykh fundamentov*. Moscow, 1966, pp. 2–6.
8. Bartolomei A.A., Omel'chak I.M., Yushkov B.S. Pile foundation settlement forecast. Moscow, Strojizdat, 1994, 384 p.
9. Liu Q.-J., Wang J.-B., Ma J.-J., Gao W.-H. Vertically-loaded single floating pile in layered soils by thin annulus element method. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, vol. 41, iss. 4, pp. 748–754. DOI: 10.11779/CJGE201904019
10. Li Y., Li W. Load-displacement behaviour of tapered piles: theoretical modelling and analysis. *Geomechanics and Engineering*, 2021, vol. 26, iss. 1, pp. 1–11. DOI: 10.12989/gae.2021.26.1.001
11. Yu G., Gong W., Dai G., Luan Y. Calculation of dragload of single pile in soft soil considering consolidation and rheology. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2020, vol. 50, iss. 4, pp. 606–615. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2020.04.002
12. Xia Z.-Q., Zou J.-F. Simplified approach for settlement analysis of vertically loaded pile. *Journal of Engineering Mechanics*, 2017, vol. 143, iss. 11, p. 04017124. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001334
13. Mert M., Ozkan M.T. A new hyperbolic variation method for settlement analysis of axially loaded single friction piles. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, vol. 13, iss. 16, p. 794. DOI: 10.1007/s12517-020-05791-z
14. Prokopenko D.V. Mathematical and computer modeling of bearing capacity of a single screw pile taking into account soil compaction. *Bulletin of P.O. Sukhoi Gomel State Technical University*, 2013, vol. 4, no. 55, pp. 25-28.
15. Xu Z., Guo Z. Experimental study on bearing characteristics and soil deformation of necking pile with cap using transparent soils technology. *Advances in Civil Engineering*, 2021, vol. 2021, p. 6625556. DOI: 10.1155/2021/6625556
16. Nasrollahzadeh E., Hataf N. Experimental and numerical study on the bearing capacity single and groups of tapered and cylindrical piles in sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2019. DOI: 10.1080/19386362.2019.1651042
17. Kazhentsev N.G., Yeschenko O.Yu. Influence of physical and mechanical properties of the foundation soil on the settlement of single drill-injection conical piles in clay soils. *Scientific support of agroindustrial complex: collection of articles on the materials of IX All-Russian conference of young scientists*, Kuban, 2016, pp. 795-796.
18. Glukhov V.S.; Khryanina O.V.; Glukhova M.V. Investigation of the influence of foundation widening in the etched pits on the settlement. *Modern scientific research and innovations*, 2015, no 4, part. 1, available at: <https://web.snauka.ru/issues/2015/04/51435> (accessed 08 October 2022).

19. Glukhov V.S.; Pankina M.V. Nonlinear deformations of the compacted soil base under the broadening of piles in punched holes. *Construction and Geotechnics*, 2023, vol. 14, iss. 1, pp. 19-28. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.02
20. Zhaisambaev E.A., Maltseva T.V., Kraev A.N. Calculation of the temperature regime of the thermostabilized base with a single pile. *Construction and Geotechnics*, 2023, vol. 14, iss. 4. pp. 5-18. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.4.01
21. Zhaisambaev E.A., Kraev A.N., Kraev A.N., Vorontsov V.V. Experimental stand for investigation of freezing-thawing processes of foundation soils in laboratory conditions. *Internet-journal "Transport Structures"*, 2020, no. 1, available at: <https://t-s.today/PDF/16SATs120.pdf> (accessed 08 October 2022).