МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
ВНИИСТ

РУКОВОДСТВО

ПО РАСЧЕТУ ЦЕНТРАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ СВАЙ В ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Р 162—74

ЦНТИ ВНИИСТа

Москва 1975

gost.e-ecolog.ru

УДК 624.139(083.75)

Руководство по расчету центрально нагруженных свай в вечномерзлых грунтах, разработанное во ВНИИСТе лабораторией трубопроводов, сооружаемых в особых условиях (канд.техн.наук В.В. Спиридоновым и инж. Р.И. Хафизовым), освещает вопросы, относящиеся к расчету одиночных центрально нагруженных свай в вечномерзлых грунтах по предельным состояниям.

Руководство разработано в развитие глав СНиП П-Б.6-66 "Основания и фундаменты зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах. Нормы проектирования" и дополнительно включает расчет центрально нагруженных свай по второму предельному состоянию (по деформациям).

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Настоящее Руководство распространяется на проектирование центрально нагруженных одиночных свай прямоугольного, круглого и кольцевого сечений в вечномерзлых однослойных и двухслойных грунтах.

I.2. Расчеты свайных фундаментов следует вести в соответствии с требованиями глав СНиП П-А.10-62 "Строительные конструкции и основания. Основные положения проектирования", СНиП П-А.П-62 "Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования", СНиП П-Б.6-66 "Основания и фундаменты зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах. Нормы проектирования", СНиП П-Б.I-62 "Основания зданий и сооружений. Нормы проектирования", СНиП П-Б.5-66 "Свайные фундаменты. Нормы проектирования" и настоящим Руководством.

I.3. При использовании сыпучемерзлых песчаных грунтов, которые не изменяют своих механических свойств и не дают осадок при изменении отрицательной температуры на положительную, следует руководствоваться требованиями глав СНиП П-Б.I-62 и СНиП П-Б.5-66.

I.4. При температуре вечномерзлого грунта на уровне подошвы сваи выше $-0,5^{\circ}C$ или допущении оттаивания вечномерзлых грунтов расчет свай выполняют без учета мерзлого состояния грунтов по нормам для талых грунтов.

I.5. При выборе расчетной схемы работы одиночной сваи в мерзлом грунте и назначении величины нормативных сопротивлений грунта необходимо учитывать способ погружения сваи в вечномерзлый грунт.

I.6. При расчете свай грунт ниже верхнего уровня вечной мерзлоты следует считать однослойным в случаях, когда:

Внесено лабораторией трубопроводов, сооружений в особых условиях:	Утверждено директором ВНИИСТа 17 сентября 1974 г.	Разработано впервые

свая погружена в пробуренную или протаянную скважину, диаметр которой превышает наибольший размер поперечного сечения сваи;

свая забита в предварительно пробуренную в однородном грунте скважину, диаметр которой меньше наименьшего размера поперечного сечения сваи;

свая забита в однородный грунт.

I.7. Грунт ниже верхнего уровня вечной мерзлоты следует считать двухслойным, если забивная или бурозабивная свая прорезает два грунтовых слоя, различных по физическим и механическим свойствам.

I.8. Сваи считают одиночными, если расстояния между их осями не меньше следующих величин:

для свай, погруженных в предварительно пробуренные скважины, - d +0,5 м;

для свай, погруженных с протаиванием грунта - $5d$;

для забивных и бурозабивных свай - $3d$,

где d - наибольший размер поперечного сечения сваи.

I.9. Нормативную глубину сезонного оттаивания грунта следует принимать равной наибольшей из ежегодных максимальных глубин сезонного оттаивания грунта по данным наблюдений (не менее IO лет) за фактическим оттаиванием грунтов на осушенной площадке, очищаемой весной от снега, без растительного и торфяного покровов.

Если нет данных многолетних наблюдений, нормативную глубину сезонного оттаивания грунта разрешается определять путем теплотехнического расчета по формуле (42) приложения 2 СНиП П-Б.6-66.

I.IO. Максимальные расчетные температуры мерзлого грунта, примыкающего к свае, принимают по данным инженерно-геологических исследований и с учетом изменения температурного режима грунта основания в процессе эксплуатации здания или сооружения. Если данных инженерно-геологических исследований не имеется, то максимальную температуру вечномерзлого грунта необходимо определять по формуле (IO) СНиП П-Б.6-66.

I.II. Расчет центрально нагруженных одиночных свай по предельным состояниям выполняют для максимальной расчетной температуры мерзлого грунта в соответствии с главами СНиП П-А.IO-62

"Строительные конструкции и основания. Основные положения проектирования". В этом расчете следует учитывать принятый принцип использования вечномерзлых грунтов оснований и их температурный режим.

I.I2. Расчет оснований и свайных фундаментов следует выполнять:

I) по первому предельному состоянию (по несущей способности):

по прочности - основания, сложенные вечномерзлыми грунтами в соответствии с СНИП П-Б.6-66 и настоящим Руководством (пп. 2.I и 2.23) и скальными грунтами в соответствии с требованиями глав СНиП П-Б.I-62 и СНиП П-Б.5-67, а также сваи согласно требованиям норм проектирования конструкций из соответствующих материалов (бетонных, железобетонных, стальных, деревянных и др.);

по устойчивости - сваи на действие сил пучения в соответствии со СНиП П-Б.6-66.

2) по второму предельному состоянию (по деформациям): основания, сложенные пластичномерзлыми, твердомерзлыми грунтами (в соответствии с пп. 2.I и 2.23 настоящего Руководства), нескальными оттаявшими или оттаивающими в процессе эксплуатации сооружений грунтами и сваи;

3) по третьему предельному состоянию (трещиностойкости):

по образованию или раскрытию трещин - железобетонные сваи и их элементы в случаях, когда это требуется нормами проектирования. (Этот случай в настоящей работе не рассмотрен).

I.I3. Нагрузки, действующие на основания и фундаменты, и сочетание нагрузок определяют в соответствии с требованиями глав СНиП П-А.I0-62 "Строительные конструкции и основания. Основные положения проектирования", СНиП П-А.П-62 "Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования", пп. 5.2 и 5.3 главы СНиП П-Б.I-62[x] "Основания зданий и сооружений. Нормы проектирования".

I.I4. Расчет свай и их оснований по деформациям выполняют на основное сочетание нормативных нагрузок, а расчет по несущей способности - на основное и дополнительное или особое сочетание расчетных нагрузок.

Условные обозначения

b^* – наименьший размер поперечного сечения нижнего торца сваи;

c – сцепление грунта, расположенного ниже подошвы сваи;

E – модуль упругости материала сваи;

$E_{гр}$ – модуль общей деформации грунта, расположенного ниже подошвы сваи;

F – площадь поперечного сечения сваи;

F_0 – площадь поперечного сечения подошвы сваи;

$F_{cq\,i}$ – площадь поверхности сдвига i -го слоя вечномерзлого грунта;

k_n – параметры степенной функции формулы (2), отражающей закономерность распределения предельных сопротивлений грунта сдвигу;

k_1, n_1, k_2, n_2 – параметры степенных функций формул (I9), (20), отражающих закономерность распределения предельных сопротивлений первого и второго слоев грунта сдвигу;

h_1, h_2 – соответственно толщины первого и второго слоев двухслойного грунта;

k_1, k_2 – коэффициенты однородности грунта основания, принимаемые согласно указаниям п. 5.6. СНиП П-Б.6-66;

$k_н$ – коэффициент сдвига для однослойного мерзлого грунта в плоскости $Z = 0$;

$k_н + k_g$ – коэффициент сдвига для однослойного мерзлого грунта в уровне подошвы сваи;

k_0 – коэффициент постели;

l – длина части сваи, вмороженной в вечномерзлый грунт;

$l_{дс}$ – толщина деятельного слоя вечномерзлого грунта;

$l_н$ – длина надземной части сваи;

m_1, m_2 – коэффициенты условий работы грунта основания, принимаемые согласно указаниям п.5.6 СНиП П-Б.6-66;

n_c – количество слоев вечномерзлого грунта, на которое разделяется толща основания в пределах поверхности смерзания сваи с грунтом;

$n_п$ – коэффициент перегрузки, величину которого назначают согласно СНиП П-А.II-62;

P – осевая нагрузка на сваю;

P_I^P – расчетная нагрузка на сваю в наиболее невыгодной комбинации (определяют при расчете свай по I предельному состоянию);

P_{II}^P – расчетная нагрузка на сваю, определяемая при расчете по П предельному состоянию;

$P^н$ – нормативная нагрузка на сваю, определяемая при расчете по П предельному состоянию;

$R^н$ – нормативное сопротивление мерзлого грунта нормальному давлению под нижним концом сваи, определяемое согласно указаниям п.5.7 СНиП П-Б.6-66 или согласно РСН 30-67;

$R^н_{сд\,i}$ – нормативное сопротивление мерзлых грунтов сдвигу по боковой поверхности смерзания для середины i -го слоя мерзлого грунта, определяемое согласно п.5.7 СНиП П-Б.6-66 или согласно РСН 30-67;

S – периметр поперечного сечения сваи;

$W(0)$ – осадка сваи в сечении $z = 0$;

$[W(0)]$ – допустимая нормативная величина осадки верхнего конца сваи;

$W_н, W_{д\,с}$ – соответственно сжатие надземной части сваи и участка, расположенного в деятельном слое вечномерзлого грунта;

$P_{пр\,1}, P_{пр\,2}, P_{пр\,3}, P_{кр}; W_{пр\,1(0)}; W_{пр\,2(0)}; W_{пр\,3(0)}; W_{кр(0)}$ – координаты характерных точек графика "осадка-нагрузка" для свай в однослойных грунтах, соответствующих различным стадиям развития зон сдвигов в мерзлом грунте вдоль боковой поверхности сваи и под нижним торцом;

z – текущая ордината, отсчитываемая от верхнего уровня вечномерзлого грунта;

z_1 – текущая ордината, отсчитываемая от верхнего уровня вечномерзлого грунта до нижней поверхности первого (верхнего) слоя;

$z_2=(z-h_1)$ – текущая ордината, отсчитываемая от нижней поверхности первого слоя до нижней поверхности второго слоя;

γ – коэффициент уменьшения несущей способности сваи, значения которого принимают согласно данным табл.I приложения I;

γ_1, γ_2 – коэффициенты уменьшения несущей способности соответственно для первого и второго слоев двухслойного грунта, значения которых принимают по табл.I, приложения I;

γ_{0i} – объемная масса грунта i -го слоя, примыкающего к свае;

$\gamma_0=\frac{\sum_{i=1}^{n}\gamma_{0i}\ell_i}{\sum_{i=1}^{n}\ell_i}$ – осредненное значение объемной массы грунта, примыкающего к боковой поверхности сваи;

Δ – осадка сечения сваи, расположенного на уровне верхнего слоя вечномерзлого грунта;

θ – абсолютное значение температуры мерзлого грунта, °С;

$\mathcal{H}$ – коэффициент зависящий от формы подошвы сваи (табл.3 приложения I);

$\mathcal{H}_д$ – коэффициент, зависящий от формы поперечного сечения подошвы сваи:

для прямоугольной формы при отношении сторон a^*/b^*

$$\mathcal{H}_g = \sqrt{\frac{a^*}{5b^*}};$$

для круглой формы поперечного сечения с диаметром

$$b^* = 0{,}89 d^*; \quad \mathcal{H}_g = 0{,}45;$$

$\mathcal{M}_0$ – коэффициент относительной поперечной деформации грунта (коэффициент Пуассона), значения которого выбирают согласно табл. 2 приложения I;

$\mathcal{V}$ – порядок функций Бесселя;

$\tau_н$ – предельное сопротивление сдвигу однослойного мерзлого грунта в плоскости $z = 0$ (см.п.2.4);

$\tau_{н1}, \tau_{н2}$ – предельное сопротивление сдвигу первого и второго слоев мерзлого двуслойного грунта в плоскостях $z_1 = 0$; $z_2 = 0$;

φ – угол внутреннего трения грунта, расположенного ниже подошвы сваи;

Φ – несущая способность основания при расчетном температурном режиме грунтов.

РАСЧЕТ ПО ПЕРВОМУ ПРЕДЕЛЬНОМУ СОСТОЯНИЮ

2.I. Расчет центрально нагруженных свай по первому предельному состоянию выполняют при максимальной температуре грунта по формуле:

$$P_I \leq \Phi,$$

где

$$\Phi = k_1 m_1 \sum_{i=1}^{n_c} R^н_{cg_i} F_{cg_i} + k_2 m_2 F_0 [1{,}8 R^н - 0{,}8 \gamma_{ocp} (\ell + \ell_{gc})]. \quad (I)$$

Примечание. Если сваи прорезают талый грунт, а также если слой сезонного промерзания – оттаивания сложен песчаными и крупнообломочными грунтами, допускается учитывать сопротивление трению этих грунтов по боковой поверхности сваи. Нормативное сопротивление талых грунтов по боковой поверхности сваи принимают согласно указаниям глав СНиП П-Б.5-67 "Свайные фундаменты. Нормы проектирования" в зависимости от способа погружения сваи.

2.2. Если температура вечномерзлого грунта на глубине I0 м ниже $-2^{\circ}C$, несущую способность основания следует определять согласно указаниям пп.5.9-5.I0 СНиП П-Б.6-66.

Расчет свай, погруженных в однослойный грунт

2.3. Согласно табл.5 СНиП П-Б.6-66, РСН 30-67 и п.I.II настоящего Руководства строим кривую изменения предельных сопротивлений сдвигу вдоль ствола сваи.

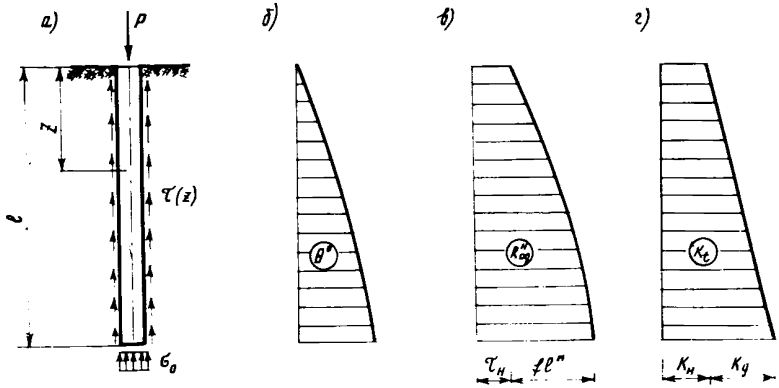

Рис.I. Эпюры распределения температур, значений нормальных сопротивлений грунта сдвигу и коэффициентов сдвига для сваи в однородном мерзлом грунте:
а-расчетная схема; б-эпюра распределения температуры в мерзлом грунте; в-эпюра распределения нормативных значений сопротивления мерзлого грунта сдвигу; г-эпюра изменения коэффициентов сдвига вдоль сваи

2.4. По методу наименьших квадратов подбираем значения параметров ξ, n и $\tau_н$ степенной функции

$$R^н_{ig}(z) = \gamma(\tau_н + \xi z^n), \qquad (2)$$

таким образом, чтобы обеспечить максимальное приближение графика этой функции (рис.I) к кривой изменения предельных сопротивлений грунта сдвигу.

2.5. Опытным путем (см.приложение 2) или по графикам, приведенным на рис.2,3, определяем значения коэффициентов сдвига при $z = 0$ и $z = l$; $K_н$ и $(K_н + K_q)$.

2.6. Величину коэффициента постели для свай с плоской подошвой определяем по формуле

$$k_0 = \frac{E_{гр}}{b^* \gamma (1-\mu_0^2)}. \qquad (3)$$

Для вмороженных свай в зависимости от абсолютного значения температуры мерзлого грунта θ значения $E_{гр}$ определяют по приведенным ниже формулам:

мерзлые грунты (при температуре от $-0,6^0$ до -10^0С)

$E_{гр} = (0,5 + 2,1\theta)\ 10^4$ кгс/см^2;

мерзлые пылеватые грунты (при температуре от $-1,5^0$С до -5^0С)

$E_{гр} = (0,4 + 1,4\theta)\ 10^4$ кгс/см^2;

мерзлые глинистые грунты (при температуре от $-1,5^0$С до -5^0С)

$E_{гр} = (0,5 + 0,23\theta)\ 10^4$ кгс/см^2;

мерзлые песчаные грунты (при температуре от нуля до $-0,6^0$С)

$E_{гр}$ (100 + 7,7 $\cdot 10^6 \theta^{12}$) кгс/см^2;

мерзлые глинистые и пылеватые грунты (при температуре от нуля до $-1,5^0$С)

$E_{гр} = 1895\ \theta^{3,6}$ кгс/см^2.

Значения коэффициента k_0 для забивных свай определяем согласно результатам испытаний (см.приложение 2).

2.7. Согласно табл.10 и 11 СНиП П-5.1-62[х] устанавливаем величину допустимой осадки сваи для рассматриваемого вида сооружения - $[W(0)]$

2.8. Находим значения критической нагрузки $P_{кр}$ и осадки верхнего торца сваи под действием этой нагрузки $W_{кр}(0)$ (рис.4):

$$P_{кр} = \gamma' S \ell \left(\tau_н + \frac{f}{n+1} e^n\right) + [1,8R^н - 0,8\gamma_0(\ell + \ell_{g.c.})]F_0;$$

$$W_{кр}(0) = \frac{\gamma S \ell^2}{EF}\left(0,5\tau_н + \beta e^n\right) - \frac{PP}{EF} - mk - \frac{\tau_н + f e^n}{k_н + k_g}, \qquad (4)$$

где $m = \left\{\left[\frac{P_{кр}}{F_0} - \frac{\gamma' S \ell}{F_0}\left(\tau_н + \frac{f e^n}{n+1}\right)\right] d + \frac{1}{2kk_0}\right\}^2 - g -$

$$-\left(\frac{1}{2kk_0}\right)^2 + \frac{d}{kk_0}; \qquad (5)$$

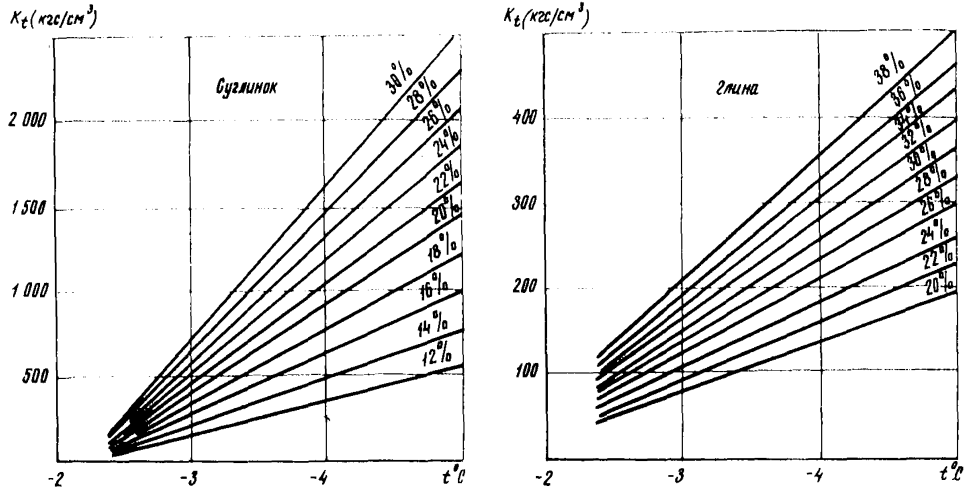

Рис.2. Графики зависимости коэффициентов сдвига глинистых мерзлых грунтов от влажности и температуры

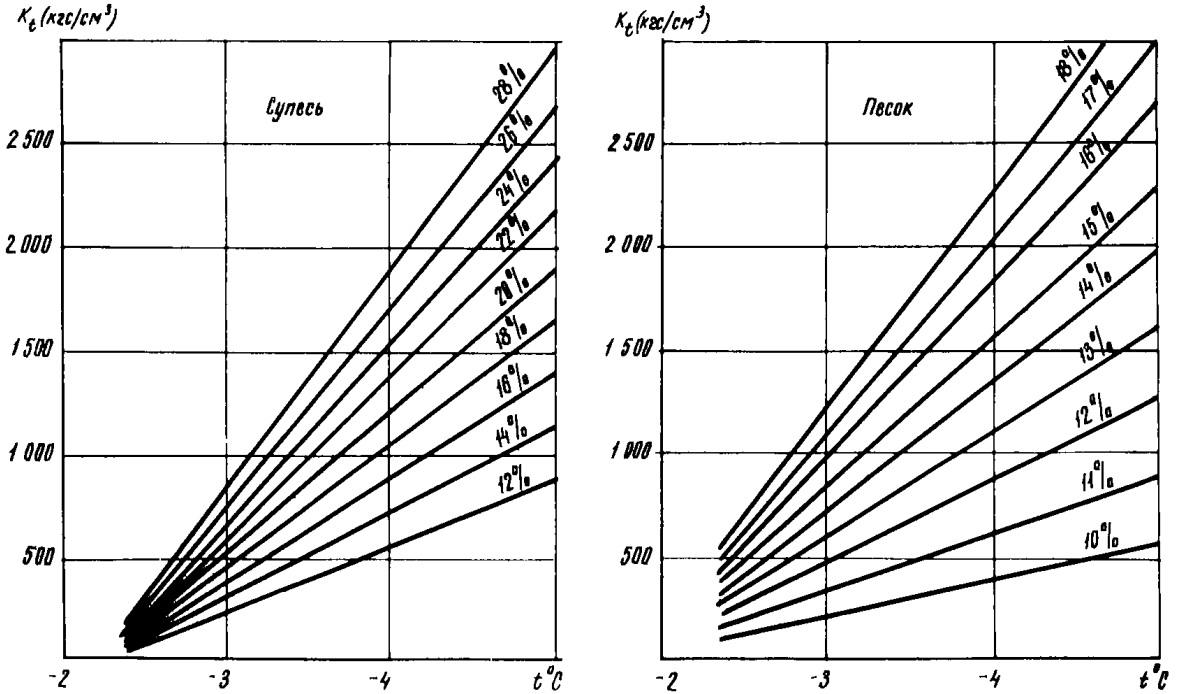

Рис.3. Графики зависимости коэффициентов сдвига песчаных мерзлых грунтов от влажности и температуры

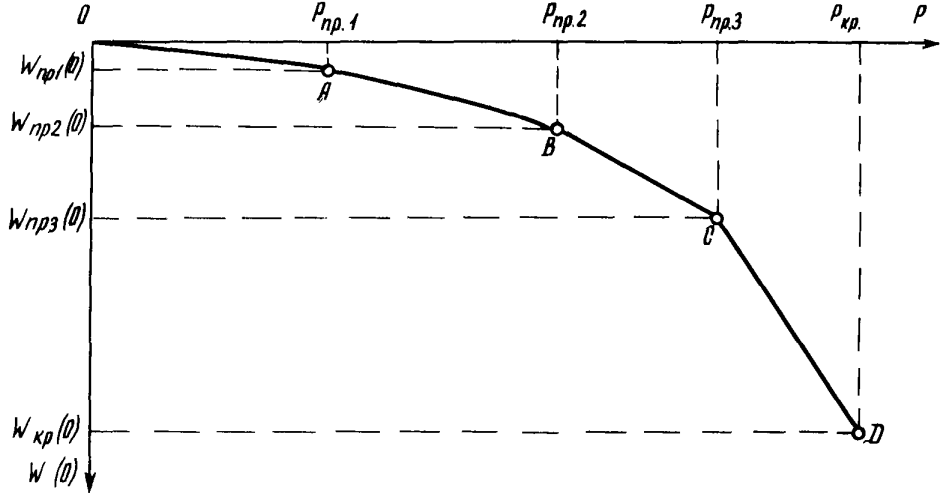

Рис.4. График зависимости осадки центрально нагруженной сваи в однородном мерзлом грунте от нагрузки

$$\beta = \frac{\ell}{(n+1)(n+2)};$$

$$k = \frac{\varkappa_g (1+\beta^*)\,\theta}{4E_{гр}\left[\gamma_0'(e+e_{gc})+2ctg\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\right]}$$

$$d = 2Ctg\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right);$$

при $C \geq 0{,}5\gamma_0' e\, tg\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)$;

$$k = \frac{\varkappa_g (1+\beta^*)\cos\varphi\, tg\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\theta}{16E_{гр}\left[\gamma_0'(e+e_{g.c})\,tg\,\varphi + C\right]}$$

$$d = \gamma_0' e$$

при $C \leq 0{,}5\gamma_0' e\, tg\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)$;

$$g = (R^н - d)^2; \qquad \beta^* = 1 - \frac{2\mu_0}{1-\mu_0};$$

2.9. Величину $W_{кр}(0)$ необходимо сопоставить с величиной

$$\Delta = [W(0)] - W_н - W_{g.c}, \tag{6}$$

где

$$W_н = \frac{P e_н^1}{EF}, \tag{7}$$

$$W_{g.c} = \frac{P e_{g.c}}{EF}, \tag{8}$$

$W_н(0)$; $W_{g.c}$ – соответственно сжатие надземной части сваи длиной $\ell_н$ и участка сваи длиной ℓ д.с., расположенного в деятельном слое вечномерзлого грунта.

Если $W_{кр}(0) \leq \Delta$, то дальнейший расчет по деформациям не ведут. В этом случае необходимо ограничиться расчетом по первому предельному состоянию.

2.10. Если $W_{кр}(0) > \Delta$, то следует определить значения нагрузки $P_{пр.з}$ и осадки $W_{пр.з}(0)$:

$$P_{прз} = \gamma S e\left(\tau_н + \frac{\ell}{n+1}e^n\right) + R^н F_0; \tag{9}$$

$$W_{прз}(0) = \frac{0{,}5\gamma S \tau_н e}{EF}\left(\frac{2EF}{k_0 F_0}+e\right) + \frac{\gamma S \ell e^{n+1}}{EF(n+1)(n+2)}\left[\frac{EF}{k_0 F_0}(n+2)+e\right] - \frac{P}{EF}\left(\frac{EF}{k_0 F_0}+e\right). \tag{10}$$

Если $W_{пр.з}(0) < 0$, то согласно зависимости по формуле (5) строят участок $\overline{СД}$ графика "осадка-нагрузка" (рис.4) и по величине осадки Δ находят значение допустимой нормативной нагрузки.

2.II. При $W_{пр.з}(0) > \Delta$ вычисляют нагрузку $P_{пр.2}$ осадку $W_{пр.2}(0)$ под действием этой нагрузки:

$$P_{пр2} = \frac{k_0 F_0}{k_н + k_g}\left(\tau_н + \gamma \ell^n\right) + \gamma S \ell \left(\tau_н + \frac{\ell}{n+1}\ell^n\right); \qquad (II)$$

$$W_{пр_2}(0) = \frac{\gamma S \ell^2}{EF}\left(0{,}5\tau_н + \beta \ell^n\right) - \frac{p\ell}{EF} - \frac{\tau_н + \gamma \ell^n}{k_н + k_g}. \qquad (I2)$$

Если $W_{пр.2}(0) < 0$, то согласно зависимости по формуле (I0) строят участок $\overline{ВС}$ графика "осадка-нагрузка" и находят значение нормативной нагрузки.

2.I2. При $W_{пр.2}(0) > 0$ следует найти значения нагрузки $P_{пр.I}$ и осадки $W_{пр.I}(0)$:

$$P_{пр.1} = \frac{\tau_н a \beta E F}{k_н[G(1-H)-H]}; \qquad (I3)$$

$$W_{пр\text{-}1}(0) = -\frac{\tau_{н_1}}{k_{н_1}}, \qquad (I4)$$

где

$$a = \frac{k_g}{k_н \ell}; \qquad \beta = \sqrt{\frac{k_н S}{EF}} \cdot \frac{1}{a},$$

$$G = \frac{k_0 F_0 N^* + K a \beta E F (1+a\ell)^{0,5}}{k_0 F_0 Q + a\beta E F (1+a\ell)^{0,5}} \cdot \frac{1}{L-K};$$

$$K = \frac{I_{-\frac{1}{3}}\left[\frac{2}{3}\beta(1+a\ell)^{1,5}\right]}{I_{-\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta\right)}; \quad L = \frac{I_{\frac{1}{3}}\left[\frac{2}{3}\beta(1+a\ell)^{1,5}\right]}{I_{\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta\right)};$$

$$Q = \frac{M - N^*}{L - K}; \qquad M = \frac{I_{-\frac{1}{3}}\left[\frac{2}{3}\beta(1+a\ell)^{1,5}\right]}{I_{\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta\right)};$$

$$N^* = \frac{I_{\frac{1}{3}}\left[\frac{2}{3}\beta(1+\alpha\ell)^{1,5}\right]}{I_{-\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta\right)},$$

$$T = \frac{I_{-\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta\right)}{I_{\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta\right)}; \qquad H = \frac{I_{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta\right)}{I_{-\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta\right)}.$$

Значения модифицированных функций Бесселя $I_{\frac{1}{3}}(x)$ и $I_{\frac{2}{3}}(x)$ при значениях аргумента, меньше 10, определяют по табл.4, приведенной в приложении I. При вычислении значения функций Бесселя отрицательного порядка ν можно пользоваться формулой

$$I_{\nu}(x) = \frac{2}{\pi} K_{\nu}(x)\sin\nu\pi + I_{\nu}(x);$$

При $0 < x \leq 1$:

$$I_{\nu}(x) \approx \frac{1}{\Gamma(\nu+1)}\left(\frac{x}{2}\right)^{\nu},$$

где $\Gamma(\nu+1)$ - гамма - функция

$\Gamma\left(\frac{1}{3}\right) = 2{,}678938535;$

$\Gamma\left(\frac{2}{3}\right) = 1{,}354117939;$

$\Gamma\left(\frac{4}{3}\right) = 0{,}892\ 979\ 512;$

$\Gamma\left(\frac{5}{3}\right) = 0{,}902\ 745\ 293.$

При $x > 10$

$$I_{\nu}(x) = \frac{e^{x}}{\sqrt{2\pi x}}\left[1 - \frac{4\nu^2 - 1}{1!\,8x} + \frac{(4\nu^2 - 1^2)(4\nu^2 - 3^2)}{2!\,(8x)^2} - \ldots\right].$$

2.13. Как правило, $W_{\text{пр.1}}(0) < \Delta$, поэтому следует построить участок $\overline{AB}$ графика "осадка-нагрузка" согласно зависимости

$$W(z) = \frac{\gamma s \ell_{\text{пл}}^2}{EF}\left(0{,}5\tau_{н} - \beta\ell_{\text{пл}}^{n}\right) - \frac{p\ell_{\text{пл}}}{EF} - \frac{\tau_{н} + \gamma\ell_{\text{пл}}^{n}}{k_{н} + k_{g}} \qquad (15)$$

и по допустимой осадке Δ найти значение нормативной нагрузки. Величину $e_{пл}$, входящую в формулу (I5), определяют графически как точку пересечения графиков функций Φ_1^* и Φ_2^*

$$\Phi_1^* = a_2 b_2 EF(\bar{\tau}_н + \ell e_{пл}^n); \qquad (I6)$$

$$\Phi_2^* = (k_н + \frac{e_{пл}}{e} k_g)\left[P - \gamma S(\bar{\tau}_н e_{пл} + \ell \frac{e_{пл}^{n+1}}{n+1})\right]\left[H_2(1+G_2) - G_2 T_2\right]; \qquad (I7)$$

где:

$$a_2 = \frac{k_{g_2}}{k_{н_2}(e - e_{пл})}; \qquad b_2 = \frac{1}{a_2}\sqrt{\frac{k_{н_2} S}{EF}};$$

$$k_{н_2} = k_н + k_g \frac{e_{пл}}{e}; \qquad k_{g2} = k_g(1 - \frac{e_{пл}}{e});$$

$$G_2 = \frac{k_0 F_0 N_2^* + K a_2 b_2 EF\left[1 + a_2(e - e_{пл})\right]^{0,5}}{k_0 F_0 Q_2 + a_2 b_2 EF\left[1 + a_2(e - e_{пл})\right]^{0,5}}, \quad \frac{1}{L_2 - K_2};$$

$$K_2 = \frac{I_{-\frac{2}{3}}\left\{\frac{2}{3} b_2\left[1 + a_2(e - e_{пл})\right]^{1,5}\right\}}{I_{-\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3} b_2\right)}; \quad L_2 = \frac{I_{\frac{2}{3}}\left\{\frac{2}{3} b_2\left[1 + a_2(e - e_{пл})\right]^{1,5}\right\}}{I_{\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3} b_2\right)};$$

$$Q_2 = \frac{M_2 - N_2^*}{L_2 - K_2}; \qquad M_2 = \frac{I_{-\frac{4}{3}}\left\{\frac{2}{3} b_2\left[1 + a_2(e - e_{пл})\right]^{1,5}\right\}}{I_{\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3} b_2\right)};$$

$$N_2^* = \frac{I_{\frac{1}{3}}\left\{\frac{2}{3} b_2\left[1 + a_2(e - e_{пл})\right]^{1,5}\right\}}{I_{-\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3} b_2\right)};$$

$$T_2 = \frac{I_{-\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3} b_2\right)}{I_{\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3} b_2\right)}; \qquad H_2 = \frac{I_{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3} b_2\right)}{I_{-\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3} b_2\right)}.$$

2.I4.Находят величину расчетной нагрузки

$$P_{II}^{P} = n_n P^{H} \qquad (I8)$$

Из значений, определенных по формулам (I) и (I8), наименьшее принимают за допустимую расчетную нагрузку, которую можно приложить к свае.

Расчет свай, погружённых в двухслойный грунт

2.I5. Согласно табл.5 СНиП П-Б.6-66 и п.I.II настоящего Руководства строят кривую изменения предельных сопротивлений сдвигу вдоль ствола сваи для каждого грунтового слоя.

2.I6. Подбирают значения f , n степенной функции

$$R_{cg_1}^{H}(z) = \gamma_1 (\tau_{H_1} + f_1 z_1^{n}), \qquad (I9)$$

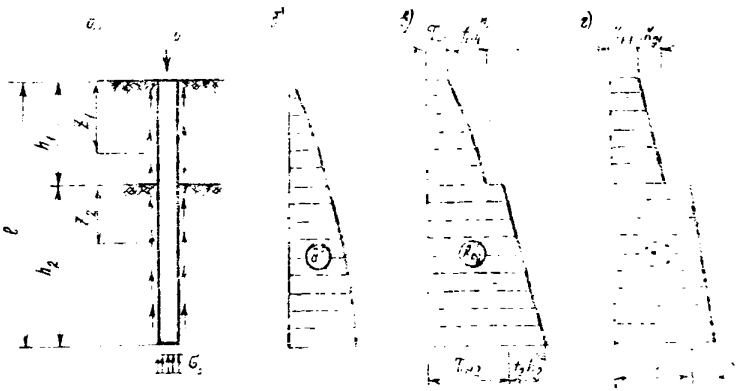

Рис.5. Эпюры распределения температур, сопротивлений грунта сдвигу и коэффициентов сдвига для сваи в двухслойном мерзлом грунте:
а-расчетная схема; б-эпюра распределения температуры в мерзлом грунте; в-эпюра распределения нормативных значений сопротивления мерзлого грунта сдвигу; г-эпюра изменения коэффициентов сдвига вдоль сваи

для первого слоя и значения ℓ_2 ; n_2 ; τ_{H_2} степенной функции

$$R^{H}_{cg_2}(z) = \gamma_2(\tau_{H_2} + \ell_2 z_2^{n_2}); \qquad (20)$$

для второго грунтового слоя таким образом, чтобы обеспечить максимальное приближение графиков этих функций (рис.5) к кривым изменениям предельных сопротивлений сдвигу в пределах каждого слоя.

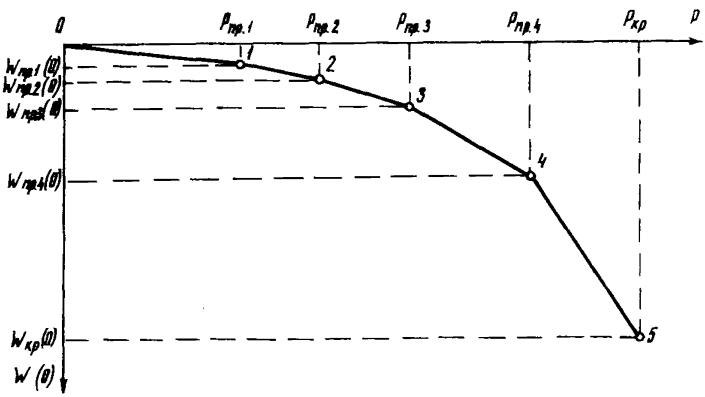

Рис.6. График зависимости осадки центрально нагруженной сваи в двухслойном мерзлом грунте от нагрузки

2.17. Значения коэффициентов k_{H_1} ; k_{H_2} ; $(k_{H_1} + k_{g_1})$; $(k_{H_2} + k_{g_2})$ и величину допустимой осадки принимают согласно пп.2.5–2.7 настоящего Руководства.

2.18. Определяют координаты первой точки графика "осадка-нагрузка" (рис.6):

$$P_{пр.1} = a_{12} b_{12} EF\left[c_{12} I_{-\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3} b_{12}\right) + c'_{12} I_{\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3} b_{12}\right)\right]; \qquad (21)$$

$$W_{пр.1}(0) = -\frac{\tau_{H_1}}{k_{H_1}},$$

где

$$C_{12}=\frac{(K_3K_6-K_1K_5)\cdot\bar{\tau}_{H_1}}{(K_3K_4-K_2K_5)k_{H_1}};\quad C'_{12}=-\frac{C_{12}I_{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{12}\right)+\frac{\bar{\tau}_{H_1}}{K_{H_1}}}{I_{-\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{12}\right)}, \tag{22}$$

$$K_1=\frac{I_{\frac{2}{3}}(D_1)}{I_{-\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{12}\right)};\qquad K_2=I_{-\frac{2}{3}}(D_1)-K_1I_{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{12}\right);$$

$$K_3=B_1\left[I_{-\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{22}\right)-\frac{d_{13}}{d_{14}}I_{\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{22}\right)\right];$$

$$K_4=B_3\left[I_{\frac{1}{3}}(D_1)-\frac{I_{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{12}\right)}{I_{-\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{12}\right)}I_{-\frac{1}{3}}(D_1)\right];$$

$$K_5=I_{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{22}\right)-\frac{d_{13}}{d_{14}}I_{-\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{22}\right);\quad K_6=\frac{I_{-\frac{1}{3}}(D_1)}{I_{-\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{12}\right)}B_3;$$

$$\alpha_{12}=\frac{k_{g_1}}{k_{H_1}h_1};\qquad \alpha_{22}=\frac{k_{g_2}}{k_{H_2}h_2};$$

$$\beta_{12}=\frac{1}{\alpha_{12}}\sqrt{\frac{k_{H_1}S}{EF}};\qquad \beta_{22}=\frac{1}{\alpha_{22}}\sqrt{\frac{k_{H_2}S}{EF}};$$

$$B_1=\frac{\alpha_{22}\beta_{22}}{\alpha_{12}\beta_{12}(1+\alpha_{12}h_1)};\qquad B_3=\sqrt{(1+\alpha_{12}h_1)};$$

$$B_2=\alpha_{22}\beta_{22}\frac{EF}{k_0F_0}\sqrt{1+\alpha_{22}h_2};$$

$$D_1=\frac{2}{3}\beta_{12}\sqrt{(1+\alpha_{12}h_1)^3};$$

$$d_{13}=B_2I_{-\frac{2}{3}}(D_2)+I_{\frac{1}{3}}(D_2);$$

$$d_{14}=B_2I_{\frac{2}{3}}(D_2)+I_{-\frac{1}{3}}(D_2);$$

$$D_2=\frac{2}{3}\beta_{22}\sqrt{(1+\alpha_{22}h_2)^3}.$$

2.19. Определяют величины $W_{пр.2}(h_1)$ и $W'_{пр.2}(h_1)$;

$$W_{пр.2}(h_1) = -\frac{\tau_{н_1} + \ell_1 h_1^{n_1}}{k_{н_1} + k g_1}; \qquad (23)$$

$$W'_{пр.2}(h_1) = -\frac{\gamma_2 S h_2^2}{EF}\left(\frac{\tau_{н_2}}{2} + \frac{\ell_2 h_2}{n_2+2}\right) - \frac{\tau_{н_2} + \ell_2 h_2^{n_2}}{k_{н_2} + k g_2}\left(1 + \frac{k_0 F_0}{EF} h_2\right) \qquad (24)$$

2.20. Если $W_{пр.2}(h_1) < W'_{пр.2}(h_1)$, то координаты точек графика "осадка-нагрузка" находят в следующей последовательности:

а) проверяют условие:

$$\frac{\tau_{н_1} + \ell_1 h_1^{n_1}}{k_{н_1} + k g_1} < \frac{\tau_{н_2}}{k_{н_2}}. \qquad (25)$$

Если это условие соблюдено, то координаты второй точки графика определяют по формулам:

$$P_{пр.2} = EF\left[d_{21} I_{-\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{22}\right) K_{22} + d_{21} I_{\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{22}\right) C'_{22} + d_{22}\right]; \qquad (26)$$

$$W_{пр.2}(0) = -(d_{17} + d_{23}) - h_1\left[d_{21} I_{-\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{22}\right) C_{22} + d_{21} I_{\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{22}\right) C'_{22} + d_{22}\right], \qquad (27)$$

где

$$C_{22} = -\frac{d_{19}}{I_{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{22}\right) - \frac{d_{13}}{d_{14}} I_{-\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta_{22}\right)}; \quad C'_{22} = -\frac{d_{13}}{d_{14}} C_{22};$$

$$d_{17} = \frac{\tau_{н_1} + \ell_1 h_1^{n_1}}{k_{н_1} + k g_1}; \qquad d_{21} = \sqrt{\frac{k_{н_2} S}{EF}};$$

$$\psi_1 = \frac{\gamma_1 S}{EF}; \qquad \beta_1 = \frac{\ell_1}{(n_1+1)(n_1+2)};$$

$$d_{22} = \psi_1\left[\tau_{н_1} h_1 + (n_1+2)\beta_1 h_1^{n_1+1}\right];$$

$$d_{23} = -\psi_1\left(0{,}5\,\tau_{н_1} h_1^2 + \beta_1 h^{n_1+2}\right).$$

Если условие (25) не соблюдено, то вместо формул (26) – (27) необходимо применить следующие формулы

$$P'_{пр.2}=\frac{EF}{h_{2\,пл}}\left[d_{11}+d_{22}+\psi_2 h_{2пл}^2\left(0{,}5\tau_{н_2}+\beta_2 h_{2пл}^{n_2}\right)-\frac{h_2\left(\tau_{н_2}+\ell_2 h_{2пл}^{n_2}\right)}{k_{н_2}h_2+k_{g_2}h_{2пл}}\right] \quad (28)$$

$$W'_{пр.2}(0)=-\left(d_{11}+d_{23}\right)-\frac{P'_{пр\,2}h_1}{EF}, \quad (29)$$

где $\psi_2=\frac{\gamma_2 S}{EF}$; $\beta_2=\frac{\ell_2}{(n_2+1)(n_2+2)}$.

Величину $h_{2\,пл}$ находят из уравнения

$$\psi_2 h_{2пл}\left[0{,}5\tau_{н_2}+(n_2+3)\beta_2 h_{2пл}^{n_2}\right]=\frac{\left(\tau_{н_2}+\ell_2 h_{2пл}^{n_2}\right)\left(m_1 m_2 h_{2пл}a'_{22}\beta'^{-1}_{22}\right)h_2}{k_{н_2}h_2+k_{g_2}h_{2пл}}, \quad (30)$$

которое решают графически или методом последовательных приближений. В этом уравнении приняты следующие обозначения:

$$m_1=\frac{1}{\frac{d_{47}}{d_{48}}I_{-\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta'_{22}\right)-I_{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta'_{22}\right)};$$

$$a'_{22}=\frac{k_{g_2}}{k_{н_2}h_2+k_{g_2}h_{2пл}}; \qquad \beta'_{22}=\frac{1}{a'_{22}}\sqrt{\frac{k_{g_2}S}{h_2 a'_{22}EF}};$$

$$m_2=\frac{d_{47}}{d_{48}}I_{\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta'_{22}\right)-I_{-\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\beta'_{22}\right);$$

б) вычисляют значения координат третьей точки графика "осадка–нагрузка"

$$P_{пр.3}=EF\left(d_{22}+C_{21}\right); \quad (31)$$

$$W_{пр.3}(0)=d_{52}+d_{23}-h_2 d_{22}-C_{21}\left(d_{51}+h_1\right), \quad (32)$$

где

$$C_{21} = d_{45} + \frac{k_0 F_0}{EF} - d_{41};$$

$$d_{41} = \frac{\tau_{H_2} + \ell_2 h_2^{n_2}}{k_{H_2} + k_{g_2}}; \quad d_{45} = (n_2 + 2)\beta_2 \psi_2 h^{n_2+1};$$

$$d_{51} = h_2 + \frac{EF}{k_0 F_0}; \quad d_{52} = d_{50} + d_{45}\frac{EF}{k_0 F_0}, \quad d_{50} = \psi_2(0{,}5\tau_{H_2} h_2^2 + \beta_2 h_2^{n_2+2});$$

в) координаты четвертой точки находят согласно выражениям:

$$P_{пр.4} = EF(d_{22} + d_{45}) + R^H F_0; \qquad (33)$$

$$W_{пр.4}(0) = d_{23} + d_{52} + d_{51} d_{22} - \frac{P_{пр\,4}(h_1 + d_{51})}{EF} - d_{41}; \qquad (34)$$

г) координаты пятой точки графика определяют по формулам:

$$P_{кр} = (d_{22} + d_{45})EF + [1{,}8R^H - 0{,}8\gamma_0(h_1 + h_2)]F_0; \qquad (35)$$

$$W_{кр}(0) = d_{23} - \frac{P_{кр} h_1}{EF} + \frac{1}{z_2}(\bar{c}_{21} d_{74} - \bar{c}_{21}^2 d_{73} - d_{75}) - d_{17},$$

где (36)

$$\bar{c}_{21} = \frac{P}{EF} - d_{22}; \quad z_1 = \frac{F_0}{EF}; \quad z_2 = \frac{1}{k}; \quad z_3 = d_{79}^2;$$

$$d_{72} = d_{45} + z_1 d_{79}; \quad d_{73} = \frac{1}{z_1^2}; \quad d_{74} = \frac{2d_{72}}{z_1^2} - z_2 h_2;$$

$$d_{75} = \left(\frac{d_{72}}{z_1}\right)^2 - z_2 d_{50} - z_3 + d_{80}; \quad d_{79} = 2c - \frac{1}{2kk_0};$$

$$d_{80} = 4c^2 - g;$$

д) по результатам вычислений строят график "осадка-нагрузка". При построении графика точки 0-I, 3-4, 4-5 следует соединить прямыми, а точки I,2,3 - плавной кривой.

2.2I. Если $W_{пр.2}(h_1) \succ W'_{пр.2}(h_1)$, то расчет ведут в изложенной ниже последовательности.

Определяют координаты второй точки графика "осадка-нагрузка" по формулам:

$$P''_{пр.2} = EF\{(\sqrt{d_{10}}(d_g + h_{1пл})[d_{85}\bar{I}_{-\frac{2}{3}}(\tfrac{2}{3}\beta'_{12}) + d_{86}\bar{I}_{\frac{2}{3}}(\tfrac{2}{3}\beta'_{12}) + \quad (37)$$

$$+ \psi_1 h_{1пл}[\bar{\tau}_{н_1} + \beta_1 (n_1+2) h_{1пл}^{n_1}]]\};$$

$$W''_{пр.2}(0) = \psi_1 (0{,}5\bar{\tau}_{н_1} + \beta_1 h_{1пл}^{n_1}) h_{1пл}^2 - \frac{P''_{пр.2}}{EF} h_{1пл} \frac{h_1(\bar{\tau}_{н_1} + \beta_1 h_{1пл}^{n_1})}{k_{н_1} h_1 + k_{g_1} h_{1пл}}, \quad (38)$$

где

$$d'_{12} = \frac{k_{g_1}}{k_{н_1} h_1 + k_{g_1} h_{1пл}}; \quad \beta'_{12} = \frac{1}{d'_{12}} \sqrt{\frac{k_{g_1} S}{h_2 d'_{12} EF}}; \quad d_g = \frac{k_{н_1} h_1}{k_{g_1}};$$

$$d_{10} = \frac{k_{g_1} S}{h_1 EF}; \quad d_{12} = \frac{2}{3}\sqrt{d_{10}(d_g + h_1)^3}; \quad d_{11} = \sqrt{d_{10}}(d_g + h_1);$$

$$d_{15} = \sqrt{d_g + h_1}; \quad d_{82} = d_{11} d_{15}[I_{\frac{1}{3}}(d_{12}) I_{\frac{2}{3}}(d_{12}) - \bar{I}_{\frac{1}{3}}(d_{12}) \bar{I}_{-\frac{2}{3}}(d_{12})];$$

$$d_{83} = d_{11} d_{51} I_{\frac{2}{3}}(d_{12}) + d_{15} \bar{I}_{-\frac{1}{3}}(d_{12}); \quad d_{84} = d_{11} d_{52} \bar{I}_{\frac{2}{3}}(d_{12});$$

$$d_{85} = \frac{d_{84} - d_{83} c_{21}}{d_{82}}; \quad d_{86} = c_{21} \frac{1 + \frac{d_{11} d_{83}}{d_{82}} I_{-\frac{2}{3}}(d_{12})}{d_{11} I_{\frac{2}{3}}(d_{12})} - \frac{d_{84} I_{-\frac{2}{3}}(d_{12})}{d_{82} I_{\frac{2}{3}}(d_{12})};$$

$$c_{21} = \frac{d_{50} - d_{41} - d_{52}}{h_2 - d_{51}}.$$

Значение $h_{1пл}$ следует определять из уравнения

$$\sqrt{d_g + h_{1пл}}\left[d_{85}\bar{I}_{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\delta_{12}\right) + d_{86}\bar{I}_{-\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\delta_{12}\right)\right] = -\frac{h_1(\tau_{н_1} + f_1 h_{1пл}^{n_1})}{k_{н_1}h_1 + k_{g_1}h_{1пл}} \cdot (39)$$

Это уравнение решают графически или методом последовательных приближений.

Определяют величину $N'_{пр.3}(e)$.

$$N'_{пр.3}(e) = EF\left(\frac{d_{17} + d_{52}}{d_{51}} - d_{45}\right). \quad (40)$$

При определении координат точек 3,4,5 графика "осадка-нагрузка" (рис.6) следует рассматривать один из двух случаев:

I случай

Если $N'_{пр.3}(e) \leq R^н F_0$, то определяют координаты согласно зависимостям:

Точка 3

$$P'_{пр\,3} = EF\left(d_{22} + \frac{d_{17} + d_{52}}{d_{51}}\right); \quad (41)$$

$$W_{пр3}(0) = d_{23} - d_{17} - h_1\left(d_{22} + \frac{d_{17} + d_{52}}{d_{51}}\right). \quad (42)$$

Точка 4

Значение $P_{пр.4}$ находят по формуле (33), а

$$W_{пр.4}(0) = d_{23} - d_{17} - d_{45} + d_{52} + d_{51}d_{22} + \frac{(d_{17} + d_{52})h_2}{d_{51}} - \frac{P_{пр\,4}(h_1 + d_{51})}{EF} \cdot (43)$$

Точка 5

Координаты вычисляют согласно выражениям(35), (36).

П с л у ч а й

Если $N'_{пр.3}(e) > R^{II}F_0$, то при вычислении значений осадок и усилий необходимо использовать следующие зависимости.

Точка 3

$$P''_{пр.3} = EF(d_{22} + C^*_{21}); \qquad (44)$$

$$W''_{пр.3}(0) = d_{23} - d_{17} - h_1(d_{22} + C^*_{21}), \qquad (45)$$

где

$$C^*_{21} = 0{,}5\,d_{87} + \sqrt{0{,}25\,d^2_{87} + \frac{d_{17}z_2 - d_{75}}{d_{73}}}\,.$$

Точки 4,5

Координаты этих точек определяют по формулам (33), (43), (35), (36).

Согласно настоящему Руководству п.2.20д строят график "осадка-нагрузка"

2.22. По величине Δ , определяемой из выражения (6), согласно графику "осадка-нагрузка" находят значение нормативной нагрузки $P^{н}$.

2.23. Сравнивают значения расчетных нагрузок, вычисленных по формулам (I) и (I8). Меньшую из нагрузок принимают за допустимую.

Примеры расчетов одиночных центрально нагруженных свай в однородных и двухслойных мерзлых грунтах даны в приложении 3.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ТАБЛИЦЫ РАСЧЕТНЫХ ВЕЛИЧИН

Таблица I

Глинистый грунт			Песчаный грунт		
$\theta^{o}C$	значения γ для свай		$\theta^{o}C$	значения γ для свай	
	бетонных или деревянных	металлических		бетонных или деревянных	металлических
4-I,5	0,49	0,40	4-I	0,46	0,38
I	0,45	0,36	0,5	0,40	0,28
0,5	0,37	0,29			

Таблица 2

Мерзлый грунт	Температура грунта, ^{o}C	Коэффициент Пуассона (μ_0)
Водонасыщенные песчаные грунты	-0,2	0,4I
	-0,4	0,32
	-0,6	0,22
	-0,8 и ниже	0,I3
Водонасыщенные пылеватые грунты	-0,3	0,35
	-0,4	0,30
	-0,6	0,22
	-0,8	0,I8
	-I,0	0,I7
	-I,2	0,I6
	-I,4	0,I5
	-I,5	0,I4
	-I,8 и ниже	0,I3
Водонасыщенные глинистые грунты	-0,5	0,45
	-0,6	0,44
	-0,8	0,42
	-I,0	0,4I
	-I,2	0,39
	-I,4	0,37
	-I,6	0,36

Окончание табл.2

Мерзлый грунт	Температура грунта, °С	Коэффициент Пуассона (μ_0)
Водонасыщенные глинистые грунты	-I,8	0,35
	-2,0	0,34
	-2,5	0,33
	-3,0	0,3I
	-3,5	0,30
	-4,0	0,28
	-4,5	0,27
	-5,0 и ниже	0,26

Таблица 3

Форма поперечного сечения подошвы сваи	Коэффициент, зависящий от формы подошвы сваи ($\varkappa$)
Круг	0,79
Квадрат	0,88
Прямоугольник при отношении сторон:	
I,5	I,08
2,0	I,22
3,0	I,44
4,0	I,6I

Таблица 4

x	$I_{\frac{1}{3}}(x)$	$\frac{2}{\pi}K_{1/3}(x)$	$I_{\frac{2}{3}}(x)$	$\frac{2}{\pi}K_{2/3}(x)$
0,0	0,000	∞	0,00000	∞
0,I	0,4I33	I,846I	0,I5057	3,026
0,2	0,5237	I,260I	0,24009	I,7837
0,3	0,605I	0,9607	0,3I70	I,27I6
0,4	0,6747	0,7676	0,3880	0,968I
0,5	0,7390	0,6296	0,4563	0,7678
0,6	0,80I2	0,5253	0,5237	0,6257
0,7	0,8636	0,4434	0,59I5	0,5I87
0,8	0,9276	0,3776	0,6609	0,4354
0,9	0,9943	0,3238	0,7326	0,3688
I,0	I,0646	0,279II	0,8075	0,3I48
I,I	I,I396	0,24I67	0,8864	0,27024
I,2	I,2I99	0,2I00I	0,970I	0,233I2
I,3	I,3065	0,I8305	I,0593	0,20I9I
I,4	I,4000	0,I6000	I,I547	0,I7547
I,5	I,50I4	I,I40I6	I,2573	0,I5294
I,6	I,6II5	0,I2302	I,3678	0,I3364
I,7	I,73I3	0,I08I8	I,4872	0,II704
I,8	I,86I7	0,09527	I,6I65	0,I0270
I,9	2,0038	0,08402	I,7567	0,09027
2,0	2,I588	0,074I9	I,9089	0,07947
2,I	2,3279	0,06559	2,0745	0,07007
2,2	2,5I24	0,05805	2,2546	0,06I85
2,3	2,7I39	0,05I42	2,4509	0,05466
2,4	2,9339	0,04559	2,6648	0,04835
2,5	3,I74	0,84045	2,898I	0,04282
2,6	3,437	0,03592	3,I53	0,03795
2,7	3,724	0,03I92	3,43I	0,03366
2,8	4,058	0,028380	3,734	0,029877
2,9	4,38I	0,025249	4,066	0,026540
3,0	4,756	0,022476	4,429	0,023591
3,I	5,I66	0,020018	4,826	0,020982
3,2	5,6I5	0,0I7838	5,259	0,0I8672

X	$I_{\frac{1}{3}}(x)$	$\frac{2}{\pi}K_{1/3}(x)$	$I_{\frac{2}{3}}(x)$	$\frac{2}{\pi}K_{2/3}(x)$
3,3	6,I06	0,0I5902	5,734	0,0I6625
3,4	6,642	0,0I4I83	6,253	0,0I48I0
3,5	7,230	0,0I2654	6,82I	0,0I3200
3,6	7,873	0,0II295	7,443	0,0II770
3,7	8,577	0,0I0085	8,I24	0,0I0499
3,8	9,347	0,009008	8,869	0,009369
3,9	I0,I90	0,008049	9,686	0,008362
4,0	II,II4	0,007I94	I0,580	0,007468
4,I	I2,I25	0,006432	II,560	0,00667I
4,2	I3,233	0,005752	I2,633	0,00596I
4,3	I4,446	0,005I45	I3,809	0,005329
4,4	I5,775	0,004604	I5,098	0,004764
4,5	I7,23I	0,004I20	I6,5II	0,00426I
4,6	I8,827	0,003688	I8,060	0,0038I2
4,7	20,576	0,003303	I9,759	0,0034II
4,8	22,493	0,0029578	2I,62I	0,003053
4,9	24,594	0,0026495	23,663	0,0027332
5,0	26,898	0,0023739	25,902	0,0024474
5,I	29,423	0,002I273	28,359	0,002I920
5,2	32,I9	0,00I9067	3I,05	0,00I9637
5,3	35,23	0,00I7093	34,0I	0,00I7594
5,4	38,56	0,00I5325	37,25	0,00I5767
5,5	42,2I	0,00I3743	40,8I	0,00I4I32
5,6	46,22	0,00I2326	44,72	0,00I2669
5,7	50,62	0,00II057	49,00	0,00II360
5,8	55,45	0,0009920	53,7I	0,00I0I87
5,9	60,74	0,0008901	58,87	0,0009I37
6,0	66,55	0,0007988	64,54	0,0008I96
6,I	72,93	0,0007I69	70,77	0,0007354
6,2	79,93	0,0006469	77,60	0,0006599
6,3	87,6I	0,0005778	85,I0	0,0005922
6,4	96,04	0,0005I88	93,34	0,0005315
6,5	I05,30	0,0004658	I02,39	0,000477I
6,6	II5,47	0,0004I84	II2,33	0,0004283

Окончание табл.4

x	$\bar{I}_{\frac{1}{3}}(x)$	$\frac{2}{\pi} K_{1/3}(x)$	$\bar{I}_{\frac{2}{3}}(x)$	$\frac{2}{\pi} K_{2/3}(x)$
6,7	I26,63	0,0003758	I23,25	0,0003846
6,8	I38,89	0,0003375	I35,24	0,0003454
6,9	I52,36	0,0003032	I48,4I	0,0003I02
7,0	I67,I5	0,00027245	I62,89	0,00027860
7,I	I83,39	0,0002448I	I78,79	0,00025026
7,2	20I,23	0,00022000	I96,26	0,00022483
7,3	220,83	0,000I9772	2I5,45	0,00020200
7,4	242,37	0,000I7779	236,55	0,000I8I5I
7,5	266,03	0,000I5974	259,73	0,000I63I2
7,6	292,02	0,000I4360	285,2I	0,000I4660
7,7	320,6	0,000I29I0	3I3,2	0,000I3I76
7,8	352,0	0,000II608	344,0	0,000II844
7,9	386,5	0,000I0438	377,8	0,000I0647
8,0	324,4	0,00009386	4I5,0	0,00009572
8,I	466,I	0,0000844I	455,9	0,00008607
8,2	5II,9	0,00007592	500,9	0,00007739
8,3	562,2	0,00006828	550,3	0,00006959
8,4	6I7,6	0,00006I42	604,6	0,00006259
8,5	678,4	0,00005525	664,4	0,00005629
8,6	745,3	0,0000497I	730,I	0,00005063
8,7	8I8,9	0,00004472	802,3	0,00004554
8,8	899,7	0,00004024	88I,8	0,00004097
8,9	988,6	0,0000362I	969,I	0,00003686
9,0	I086,4	0,00003258	I065,3	0,0000336
9,I	II94,0	0,000029322	II7I,0	0,000029837
9,2	I3I2,2	0,000026389	I287,2	0,000026847
9,3	I442,3	0,00002375I	I4I5,I	0,000024I59
9,4	I585,3	0,00002I377	I555,8	0,00002I74I
9,5	I742,6	0,0000I9242	I7I0,6	0,0000I9566
9,6	I9I5,7	0,0000I732I	I880,8	0,0000I76I0
9,7	2I06,I	0,0000I5593	2068,I	0,0000I585I
9,8	23I5,5	0,0000I4038	2274,2	0,0000I4268
9,9	2545,8	0,0000I2639	2500,9	0,0000I2843
I0,0	2799,2	0,0000II379	2750,4	0,0000II562

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ

При выборе значений коэффициентов сдвига и коэффициентов уменьшения несущей способности можно использовать графики, приведенные на рис. 2-3, и таблицу I приложения I[x]. Однако учитывая большое многообразие грунтов в районах вечной мерзлоты, рекомендуется определять эти коэффициенты опытным путем непосредственно в местах установки свай (см. приложение 4).

Коэффициент постели необходимо определять испытанием свай и заглубленных штампов в условиях района строительства. По мере накопления экспериментального материала, очевидно, появится возможность составить таблицы нормативных значений расчетных коэффициентов.

Величины k_0, k_t, γ можно определять двумя методами.

Первый метод следует применять при наличии хорошо оборудованной холодильной камеры с устойчиво поддерживаемой отрицательной температурой. Коэффициенты k_t и γ определяют испытаниями моделей жестких свай[xx], загружаемых выдергивающей или вдавливающей нагрузкой. В последнем случае грунт под нижним торцом не должен препятствовать перемещениям подошвы сваи; это достигается, например, укладкой под него поролона с замкнутыми порами, обмазанного герметиком.

Фактура боковой поверхности должна соответствовать материалу и качеству поверхности применяемых при строительстве свай. Модели необходимо испытывать в грунтовых и температурных условиях, аналогичных соответствующим условиям в районе строительства.

Если сваи предполагают устанавливать в пробуренные или пропаренные скважины, то модели нужно вморозить в грунтовый раствор с соответствующими физическими свойствами. Испытания проводят с пятикратным дублированием при ступенчатом нагруже-

---

x При температуре грунта выше $-2{,}5^{\circ}C$ значения k_t определяют по формуле: $K_t = 0{,}40\ K_t\ (2{,}5)$, где $K_t\ (2{,}25)$ – значение коэффициента при температуре $-2{,}5^{\circ}C$.

xx Свая считается жесткой, если $I > \frac{th\alpha e}{\alpha e} > 0{,}95$. Здесь $\alpha = \sqrt{\frac{k_t S}{EF}}$.

нии. Каждую ступень выдерживают до полной стабилизации осадок. Первую ступень принимают равной $0{,}4\,R^{н}_{сд}S\ell$ ($R^{н}_{сд}$ принимают по табл.5 СНиП II-Б.6-66 , $S\ell$ - площадь контакта боковой поверхности модели с мерзлым грунтом), а следующие ступени - по $0{,}2\,R^{н}_{сд}S\ell$.

Перемещения верхних торцов $W(0)$ измеряют индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм.

После срыва моделей нагрузку снимают и проводят повторное испытание до вторичного срыва. По результатам испытаний значения k_t и γ вычисляют согласно формул:

$$k_t = \frac{P}{S\ell\,W(0)}\,; \qquad (46)$$

$$\gamma = \frac{P_{2кр}}{P_{1кр}}\,, \qquad (47)$$

где $P_{1кр}$; $P_{2кр}$ - нагрузки, при которых произошли соответственно первичный и вторичный срыв моделей.

Для определения коэффициентов сдвига и коэффициентов постели грунтов при забивном и бурозабивном методе погружения свай рекомендуется воспользоваться вторым методом.

Второй метод помогает найти характеристику грунтов по результатам испытаний свай в полевых условиях. Испытывают две сваи. Первую сваю забивают на глубину 1,0-1,5 м от поверхности вечномерзлого грунта и испытывают на выдергивание. Вторую сваю забивают таким образом, чтобы ее подошва находилась на проектной отметке, а рабочая, соприкасающаяся с грунтом длина составляла 1,0-1,5 м. Этого можно достигнуть, пробурив в грунте скважину диаметром, больше максимального поперечного размера сваи, на глубину, меньше проектной на 1,0-1,5 м. Первую сваю испытывают на выдергивание, а вторую - последовательно на выдергивание и вдавливание. Эксперименты проводят при максимальной температуре вечномерзлых грунтов. Каждую ступень нагрузки выдерживают до полного затухания деформаций свай. Максимальная величина нагрузки не должна превышать значения $R^{н}_{сд_{ср}}$ где $R^{н}_{сд_{ср}}$ является средним арифметическим из величин $R^{н}_{сд}$ на уровне подошвы сваи и $R^{н}_{сд}$ на уровне поверхности грунта,

расположенной на I,0–I,5 м от нижнего торца. Благодаря этому ограничению все точки экспериментальных графиков "осадка-нагрузка" должны быть расположены на прямой $\overline{OA}$ (рис.4).

Значения коэффициентов определяют по формулам:

$$k_н = \frac{P_1}{S\ell_1 W_{(0)_1}}; \tag{48}$$

$$k_н + k_g = \frac{P_2}{S\ell_2 W_{(0)_2}}; \tag{49}$$

$$k_0 = \frac{1}{F_0}\left[\frac{P_2'}{W_{(0)_2}'} - (k_н + k_g) S\ell_2\right], \tag{50}$$

где $k_н$; $(k_н + k_g)$ – коэффициенты сдвига соответственно на уровне поверхности вечномерзлого массива и на проектной глубине забивки свай в мерзлый грунт;

$W_{(0)_1}$; $W_{(0)_2}$; $W_{(0)_2}'$ – перемещения сечений свай, расположенных на уровне контакта с мерзлым грунтом под действием выдергивающих нагрузок P_1 для первой сваи; выдергивающих нагрузок P_2, или вдавливающих усилий P_2 для второй сваи;

ℓ_1; ℓ_2 – заглубление соответственно первой или второй сваи.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример I

Требуется определить расчетную нагрузку на железобетонную сваю 30х30 см, вмороженную в глинистый грунт при льдистости меньше 0,I на глубину 900 см. Температура мерзлого грунта увеличивается с глубиной по линейному закону от 0 до -0,8°С.

Толщина деятельного слоя вечномерзлого грунта - I00 см.

Длина надземной части сваи - 200 см.

Допускаемая осадка верхнего торца сваи - 0,8 см.

Объемная масса грунта - I,7 г/см^3.

Коэффициент перегрузки n_n = I,3.

Коэффициенты сдвига равны: $k_н$ = 0; k_g = 32 кгс/см^3.

Расчет ведут в следующей последовательности.

I. Согласно исходным данным имеем:

$$F = F_0 = 900 \text{ см}^2;$$
$$S = 120 \text{ см};$$
$$\ell = 900 \text{ см};$$
$$\ell_н = 200 \text{ см};$$
$$\ell_{дс} = 100 \text{ см};$$
$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2;$$
$$\gamma_0 = 1{,}7 \text{ гс/см}^3;$$
$$\varphi = 0.$$

2. Согласно табл.I-3 приложения I находим

μ_0 = 0,42; $\varkappa$ = 0,88; γ = 0,43.

3. Учитывая указания п 2.3, определяем величину k_0

$$k_0 = \frac{1895 \cdot 0{,}8^{3{,}6}}{30 \times 0{,}88\ (1-0{,}42^2)} = 38{,}3 \text{ кгс/см}^3.$$

Значение $R^н$ выбираем по таблице 6 СНиП П-Б.6-66 при θ = -0,8°С : $R^н$ = 5,2 кгс/см^2.

4. Согласно п.2.4 настоящего Руководства подбираем значения параметров степенной функции (2).

Последовательность расчета приведена в таблице 5.

Таблица 5

k	Z, см	θ, °С	$R^н_{сд}$, кгс/см^2	$\frac{R^н_{сд}}{r}$, кгс/см^2	$y=\frac{R^н_{сд}}{r}$	$x=lg(t)$	x_c^2	y_i^2	$x_i y_i$
I	0	0	0	0	–	–	–	–	–
2	I50	0,I4	0,I4	0,33	–0,49	2,I9	4,8I	0,24	-I,07
3	300	0,27	0,27	0,63	–0,20	2,48	6,I5	0,04	–0,50
4	450	0,40	0,40	0,93	–0,03	2,65	7,02	0,00	–0,08
5	600	0,53	0,53	I,23	0,09	2,78	7,73	0,0I	0,25
6	750	0,67	0,67	I,56	0,I9	2,88	8,29	0,04	0,55
7	900	0,80	0,80	I,86	0,27	2,95	8,70	0,07	0,80

Согласно методу наименьших квадратов:

$$n = \frac{\sum_1^k x_i y_i - \bar{x}\sum_1^k y_i}{\sum_1^k x_i^2 - \bar{x}\sum_1^k x_i},$$

$$lg\,\phi = \frac{\bar{y}\sum_1^k x_i - \bar{x}\sum_1^k x_i y_i}{\sum_1^k x_i^2 - \frac{1}{k}\left(\sum_1^k x_i\right)^2},$$

где

$$\bar{x} = \frac{1}{k}\sum_1^k x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{k}\sum_1^k y_i;$$

$$n = \frac{-0,05 - 2,66\,(-0,I6)}{42,79 - 2,66 \cdot I5,93} = I,00;$$

$$lg\,\phi = \frac{-0,0284 \cdot 42,79 - 2,66\,(-0,05)}{42,70 - 42,30} = -2,685;$$

$\phi = 2,07 \cdot I0^{-3}$ кгс/см^3.

5. Согласно формулам (4) и (5) определим значения $P_{кр}$ и $W_{кр}(0)$:

$$P_{кр} = 0,43 \cdot I20 \cdot 900\,(0 + \frac{2,07 \cdot I0^{-3}}{I+I}\,900^{I}) + (I,8 \cdot 5,2 - 0,8 \cdot I,7 \cdot$$

$$\cdot I0^{-3} \cdot I000) = 50,7 \cdot I0^{3} \text{ кгс};$$

$$W_{кр}(0) = \frac{0,43 \cdot I20 \cdot 900^2}{2 \cdot I0^5 \cdot 900}\,(0 + I,04 \cdot I0^{-3} \cdot 900^{I}) - \frac{50,7 \cdot I0^3 \cdot 900}{2 \cdot I0^5 \cdot 900} -$$

$$- 5I6 \cdot 0,45 \cdot I0^{-3} - \frac{0 + 2,07 \cdot I0^{-3} \cdot 900^{I}}{0 + 32} = 0,33 \text{ см},$$

где $\beta = \frac{2,07 \cdot 10^{-3}}{(1+1)(1+2)} = 1,04 \cdot 10^{-3}$ кгс/см^3;

$\beta^* = 1 - \frac{2 \cdot 0,42}{1 - 0,42} = -0,44$;

$E_{гр} = 1895 \cdot 0,8^{3,6} = 830$ кгс/см^2;

$C = \frac{R^н}{3,14} = \frac{5,2}{3,14} = 1,65$ кгс/см^2; $d = 2 \cdot 1,65 = 3,30$ кгс/см^2;

$q = (5,20 - 3,30)^2 = 3,62$ кгс/см^4;

$k = \frac{0,446\ (1-0,44) \cdot 0,30}{4 \cdot 830\ \left[1,7 \cdot 10^{-3}(900+100)+2 \cdot 1,65 \cdot 1\right]} = 0,45 \cdot 10^{-3}$ кгс^2/см^5;

$$m = \left\{ \left[\frac{50,7 \cdot 10^8}{900} - \frac{0,43 \cdot 120 \cdot 900}{900} \left(0 + \frac{2,07 \cdot 10^{-3} \cdot 900^1}{1+1}\right) \right] - 3,30 + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2 \cdot 0,45 \cdot 10^{-8} \cdot 38,3} \right\}^2 - 3,62 - \left(\frac{1}{2 \cdot 0,45 \cdot 10^{-8} \cdot 38,3}\right)^2 +$$

$$+ \frac{3,30}{0,45 \cdot 10^{-3} \cdot 38,3} = 516 \text{ кгс}^2/\text{см}^4.$$

Сопоставим величину $W_{кр}(0)$ с величиной Δ (см.2.9):

$$W_н = \frac{50,7 \cdot 10^3 \cdot 200}{2 \cdot 10^5 \cdot 900} = 0,056 \text{ см};$$

$$W_{д.с} = \frac{50,7 \cdot 10^8 \cdot 100}{2 \cdot 10^5 \cdot 900} = 0,028 \text{ см}.$$

$$\Delta = 0,80 - 0,056 - 0,028 = 0,71 \text{ см}.$$

Так как $0,33 < 0,71$, то дальнейший расчет по деформациям не ведут, а за расчетную нагрузку принимают величину несущей способности сваи, определяемой по формуле (I):

$\Phi = 0,8 \cdot 1 \cdot 0,40 \cdot 120 \cdot 900 + 0,8 \cdot 1,2 \cdot 900\ (1,8 \cdot 5,2 - 0,8 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 900) =$
$= 43,8 \cdot 10^8$ кгс.

Пример 2

Требуется определить расчетную нагрузку на железобетонную забивную сваю сечением 25х25 см в глинистом грунте с $J_L < 0,1$.

Температура мерзлого грунта изменяется по линейному закону от 0 до $-0{,}5^{0}$С.

Толщина деятельного слоя $\ell_{д.с.}$ = 200 см;

длина надземной части сваи $\ell_{н}$ = 200 см;

заглубление сваи в мерзлый грунт ℓ = 1000 см.

Допускаемая осадка верхнего торца сваи – 8 мм.

Объемная масса грунта γ_{0} = 1,6 г/см^{3};

φ = 0.

Коэффициенты сдвига равны: $k_{н}$ = 0;

k_{ℓ} = 10 кгс/см^{3}.

Модуль упругости сваи E = $2\cdot10^{5}$ кгс/см^{2};

$n_{п}$ = 1,2.

Расчет ведут в следующей последовательности.

1. Определим геометрические характеристики сваи.

S = 100 см; $F = F_{0}$ = 625 см^{2}.

2. Согласно табл.1-3 приложения 1 находим:

μ_{0} = 0,45; γ = 0,37; $\varkappa$ = 0,88.

3. Согласно указаниям п.2.6 определим величину коэффициента постели:

$E_{гр} = 1895\cdot0{,}5^{3{,}6} = 159$ кгс/см^{2};

$$k_{0} = \frac{159}{25\cdot0{,}88(1-0{,}45^{2})} = 9{,}05 \text{ кгс/см}^{3}.$$

Значения $R^{н}$ выбираем по табл.6 СНиП II-Б.6-66:

$R^{н}$ = 4 кгс/см^{2}.

4. Подбираем параметры степенной функции. Так как при $\theta = 0^{0}$С – $R^{н}_{сд}$ = 0, а при $\theta = 0{,}5^{0}$С – $R^{н}_{сд}(0{,}5)$ = = 0,5 кгс/см^{2} (см. табл.5 СНиП II-Б.6-66), то согласно формуле (2) получим:

$\tau_{н}$ = 0; n = 1,0, ибо зависимости $\theta = \theta(z)$ и $R^{н}_{сд} - R^{н}_{сд}(z)$ – линейные,

$$\ell = \frac{R^{н}_{сд}(0{,}5)}{\ell^{n}} = \frac{0{,}5}{0{,}37\cdot1000^{1}} = 1{,}35\cdot10^{-3} \text{ кгс/см}^{3}.$$

5. По формулам (4) и (5) определим значения $P_{кр}$ и $W_{кр}(0)$:

$$P_{кр} = 0{,}37\cdot100\cdot1000(0 + \frac{1{,}35\cdot10^{-3}}{1+1}\cdot1000^{1}\left[1{,}8\cdot4 - 0{,}8\cdot1{,}6\cdot10^{-3}\times\right.$$

$$\left.\times(1000 + 200)\right] 625 = 28{,}56\cdot10^{8} \text{ кгс};$$

$$\beta = \frac{1{,}35 \cdot 10^{-3}}{(1+1)\ (1+2)} = 0{,}23 \cdot 10^{-3} \text{ кгс/см}^3;$$

$$C = \frac{R^н}{3{,}14} = \frac{4}{3{,}14} = 1{,}27 \text{ кгс/см}^2;$$

$$d = 2 \cdot 1{,}27 = 2{,}54 \text{ кгс/см}^2;$$

$$g = (4 - 2{,}54) = 1{,}46 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\beta^* = 1 - \frac{2 \cdot 0{,}45}{1 - 0{,}45} = -0{,}64;$$

$$k = \frac{0{,}446\ (1 - 0{,}64) \cdot 25}{4 \cdot 159(1{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}2 \cdot 10^{8} + 1{,}27 \cdot 2)} = 1{,}41 \cdot 10^{-3} \text{ см}^5/\text{кгс}^2;$$

$$m = \left\{ \left[\frac{28{,}56 \cdot 10^{8}}{625} - \frac{0{,}37 \cdot 100 \cdot 10^{3}}{625} \left(0 + \frac{1{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot 1000^{1}}{1 + 1}\right) \right] - \right.$$

$$\left. - 2{,}54 + \frac{1}{2 \cdot 1{,}41 \cdot 10^{3} \cdot 9{,}05} \right\}^2 - 1{,}46 - \left(\frac{1}{2 \cdot 1{,}41 \cdot 10^{3} \cdot 9{,}05}\right)^2 +$$

$$+ \frac{2{,}54}{1{,}41 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}05} = 0{,}47 \cdot 10^{3} \text{ кгс/см}^4;$$

$$W_{кр}(0) = \frac{0{,}37 \cdot 100 \cdot 1000^2}{2 \cdot 10^{5} \cdot 625} (0 + 0{,}23 \cdot 10^{-3} \cdot 1000^{1}) - \frac{28{,}36 \cdot 10^{3} \cdot 10^{3}}{2 \cdot 10^{5} \cdot 625} -$$

$$- 0{,}47 \cdot 10^{3} \cdot 1{,}41 \cdot 10^{-3} - \frac{0 + 1{,}35 \cdot 10^{-3} \cdot 1000^{1}}{0 + 10} = 0{,}82 \text{ см}.$$

6. Сопоставим величину $W_{кр}(0)$ с величиной Δ

$$W_{дс} = W_н = \frac{28{,}56 \cdot 10^{3} \cdot 200}{2 \cdot 10^{5} \cdot 625} = 0{,}046 \text{ см};$$

$$\Delta = 0{,}80 - 0{,}046 - 0{,}046 = 0{,}71 \text{ см}.$$

7. Так как $0{,}82 > 0{,}75$, то согласно п. 2.10 следует определить значения $P_{пр.з}$ и $W_{пр.з}(0)$:

$$P_{пр.з} = 0{,}37 \cdot 100 \cdot 1000 \left(0 + \frac{1{,}35 \cdot 10^{-3}}{1+1} 1000^{1}\right) + 4 \cdot 625 = 27{,}5 \cdot 10^{3} \text{ кгс}.$$

$$W_{пр.з} = 0 + \frac{37 \cdot 100 \cdot 1{,}35 \cdot 10^{-3} \cdot 1000^2}{2 \cdot 10^{5} \cdot 625 (1+1)\ (1+2)} \left[\frac{2 \cdot 10^{5} \cdot 625}{9{,}05 \cdot 625} \cdot (1+2) + 1000 \right] -$$

$$- \frac{27{,}5 \cdot 10^{8}}{2 \cdot 10^{5} \cdot 625} \left(\frac{2 \cdot 10^{5} \cdot 625}{9{,}05 \cdot 625} + 1000 \right) = 0{,}60 \text{ см}.$$

8. Сопоставим величины $W_{пр.з}(0)$ и Δ

$$W_{дс} = W_н = \frac{27{,}5 \cdot 10^3 \cdot 200}{2 \cdot 10^5 \cdot 625} = 0{,}044 \text{ см};$$

$\Delta = 0{,}80 - 0{,}044 - 0{,}044 = 0{,}71$ см.

9. Так как $0{,}60 < 0{,}71$, то необходимо построить участок $\overline{СД}$ графика "осадка-нагрузка" (рис.4) и по величине осадки определить значение нормативной нагрузки.

Для упрощения вычислений соединяем отрезком прямой точки С и Д графика с координатами:

$P = 28{,}6$ тс; $W = 0{,}82 + 0{,}092 = 0{,}91$ см;

$P = 27{,}5$ тс; $W = 0{,}60 + 0{,}088 = 0{,}69$ см.

По графику находим, что осадке 0,8 см соответствует нормативная нагрузка $P^н = 28{,}0$ тс

Согласно формуле (I8) $P^р = 1{,}2 \cdot 28 = 33{,}6$ тс.

I0. Согласно формуле (I) определим несущую способность сваи

$$\Phi = 0{,}8 \cdot 1 \cdot 0{,}25 \cdot 1000 \cdot 100 + 0{,}8 \cdot 1{,}2 \cdot 625 \left[1{,}8 \cdot 4 - 0{,}8 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-3} (1000 + 200)\right] = 23{,}4 \cdot 10^8 \text{ кгс}.$$

II. Так как 23,4 тс < 33,6 тс, то расчетную величину нагрузки принимаем равной 23,4 тс.

Пример 3

Требуется определить величину расчетной нагрузки на деревянную сваю диаметром 30 см, рабочей длиной I000 см при допустимой осадке верхнего торца 8 мм.

Исходные данные:

$S = 94{,}2$ см;
$F = F_0 = 706{,}5$ см^2;
$E = 10^5$ кгс/см^2;
$\tau_н = 0{,}2$ кгс/см^2;
$n_1 = 2$;
$\psi_1 = 1{,}33 \cdot 10^{-5}$ кгс/см^4;
$h_1 = 300$ см;
$R_н = 10$ кгс/см^3;
$k_{g_1} = 100$ кгс/см^3;
$\tau_{н2} = 1{,}0$ кгс/см^2
$\psi_2 = 0{,}71 \cdot 10^{-3}$ кгс/см^3;
$h_2 = 700$ см;
$h_1 = 1$;
$R_{н_2} = 20$ кгс/см^3;
$k_{g_2} = 10$ кгс/см^3;
$k_0 = 30$ кгс/см^3;
$\gamma_1 = 0{,}8$;
$\gamma_2 = 0{,}6$;
$\ell_н = 100$ см;
$\ell_{дс} = 33$ см;
$R^н = 16$ кгс/см^2;
$\gamma_0 = 1{,}7$ г/см^3;
$n_п = 1{,}2$.

Расчет ведут в следующей последовательности

1. $a_{12}=\frac{100}{10\cdot300}=0{,}33\cdot10^{-1}$ см$^{-1}$;

$$\beta_{12}=\frac{1}{0{,}33\cdot10^{-1}}\sqrt{\frac{100\cdot94{,}2}{0{,}33\cdot10^{-1}\cdot300\cdot10^{5}\cdot706{,}5}}=0{,}11;$$

$$a_{22}=\frac{10}{20\cdot700}=0{,}71\cdot10^{-3}\ \text{см}^{-1};$$

$$\beta_{22}=\frac{1}{0{,}71\cdot10^{-3}}\sqrt{\frac{10\cdot94{,}2}{0{,}71\cdot10^{-3}\cdot700\cdot10^{5}\cdot706{,}5}}=7{,}3;$$

$$D_1=\frac{2}{3}\cdot0{,}11(1+0{,}33\cdot10^{-1}\cdot300)^{1{,}5}=2{,}64;$$

$$D_2=\frac{2}{3}\cdot7{,}3\,(1+0{,}71\cdot10^{-3}\cdot700)^{1{,}5}=8{,}93;$$

$$d_{76}=0{,}13(23{,}02+23{,}02)=6{,}00;$$

$$B_3=(1+0{,}33\cdot10^{-1}\cdot300)^{0{,}5}=3{,}30;$$

$$d_{13}=21{,}05\cdot1{,}00\cdot10^{3}+1{,}02\cdot10^{3}=20{,}03\cdot10^{3};$$

$$d_{14}=20{,}03\cdot10^{3};$$

$$B_1=\frac{0{,}71\cdot10^{-3}\cdot7{,}3}{0{,}33\cdot10^{-1}\cdot0{,}11\cdot10{,}9}=0{,}13;$$

$$B_2=0{,}71\cdot10^{-3}\cdot7{,}3(1+0{,}71\cdot10^{-3}\cdot700)^{0{,}5}\,\frac{10^{5}\cdot706{,}5}{30\cdot706{,}5}=21{,}05;$$

$$K_1=\frac{3{,}26}{2{,}26}=1{,}44\ ;$$

$$K_2=3{,}29-1{,}44\cdot0{,}29=2{,}87\ ;$$

$$K_3=0{,}13(23{,}02-\frac{20{,}03}{20{,}03}\ 23{,}02)\approx0;$$

$$C_{12}=\frac{0\cdot K_6-1{,}44K_5}{0\cdot K_4+2{,}87K_5}\cdot\frac{0{,}20}{10}=10^{-2}\ \text{см};$$

$$C'_{12}=-(10^{-2}\cdot0{,}29+\frac{0{,}20}{10})\frac{1}{2{,}26}=-10^{-2}\text{см};$$

$P_{пр.1}=0{,}33\cdot10^{-1}\cdot0{,}11\cdot10^{5}\cdot706{,}5\,(10^{-2}\cdot3{,}49\cdot10^{-2}\cdot0{,}11)=$
$=8{,}68\cdot10^{3}$ кгс;

$$W_{пр.1}(0)=-\frac{0{,}2}{10}=-0{,}02\ \text{см}.$$

2. По формулам (23), (24) имеем:

$$W_{пр2}(h_1) = \frac{0{,}20 + 1{,}33 \cdot 10^{-5} \cdot 300^2}{10 + 100} = -1{,}3 \cdot 10^{-2} \text{ см};$$

$$W'_{пр2}(h_1) = \frac{0{,}6 \cdot 94{,}2 \cdot 700^2}{10^5 \cdot 706{,}5} \left(\frac{1}{2} + \frac{0{,}71 \cdot 10^{-3} \cdot 700}{1 + 2}\right) - \frac{1{,}0 + 0{,}71 \cdot 10^{-3} \cdot 700}{20 + 10} \times$$

$$\times \left(1 + \frac{30 \cdot 700}{10^5}\right) = -0{,}321 \text{ см}.$$

Так как 0,321 > 0,013, то срыв в первом слое наступит раньше, чем во втором. Подставив исходные данные в условия (25), можно установить, что в момент полного сдвига сваи в первом слое грунт во втором слое находится в упругом состоянии .

3. Значения предельной осадки и предельного усилия определяют по формулам (26), (27)

$$d_{11} = 1{,}3 \cdot 10^{-2} \text{ см};$$

$$d_{21} = \left(\frac{20 \cdot 94{,}2}{10^5 \cdot 706{,}5}\right)^{0{,}5} = 0{,}52 \cdot 10^{-2} \text{ см};$$

$$d_{22} = \frac{0{,}8 \cdot 94{,}2}{10^5 \cdot 706{,}5}\left[0{,}2 \cdot 300 + (2+2)\frac{1{,}33 \cdot 10^{-5}}{(2+1)(2+2)} 300^3\right] =$$

$$= 0{,}19 \cdot 10^{-5};$$

$$d_{23} = \frac{0{,}8 \cdot 94{,}2}{10^5 \cdot 706{,}5}\left[0{,}5 \cdot 0{,}2 \cdot 300^2 + \frac{1{,}33 \cdot 10^{-5}}{(2+1)(2+2)} 300^4\right] =$$

$$= -11{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ см};$$

$$C_{22} = \frac{-1{,}3 \cdot 10^{-2}}{23{,}963 - \frac{20{,}03}{20{,}03} 24{,}003} = 0{,}325;$$

$$C'_{22} = -0{,}325;$$

$$P_{пр.2} = 10^5 \cdot 706{,}5(0{,}52 \cdot 10^{-2} \cdot 23{,}02 \cdot 0{,}325 - 0{,}52 \cdot 10^{-2} \cdot 23{,}02 \times$$

$$\times 0{,}325 + 0{,}19 \cdot 10^{-3}) = 13{,}41 \cdot 10^3 \text{ кгс};$$

$$W_{пр.2}(0) = -(1{,}3 \cdot 10^{-2} - 11{,}5 \cdot 10^{-3}) - 300 \cdot 0{,}19 \cdot 10^{-3} = -0{,}06 \text{ см}.$$

4. Предельное усилие и осадку в момент полного срыва сваи определяют из выражений (31), (32)

$$d_{41} = \frac{1{,}0 + 0{,}71 \cdot 10^{-3} \cdot 700}{20 + 10} = 0{,}05 \text{ см};$$

$$d_{50} = \frac{0,6 \cdot 94,2}{10^5 \cdot 706,5}\left(0,5 \cdot 1,0 + \frac{0,71 \cdot 10^{-3}}{3,2} \cdot 700\right) \cdot 700^2 = 0,228 \text{ см};$$

$$d_{51} = 700 + \frac{10^5 \cdot 706,5}{30 \cdot 706,5} = 4,03 \cdot 10^3 \text{ см};$$

$$d_{52} = 0,228 + 0,70 \cdot 10^{-3}\,\frac{10^5 \cdot 706,5}{30 \cdot 706,5} = 2,56 \text{ см};$$

$$d_{45} = 3 \cdot 0,8 \cdot 10^{-6} \cdot 700^2\,\frac{0,71 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 2} + 0,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,0 \cdot 700 =$$

$$= 0,70 \cdot 10^{-3};$$

$$C_{21} = 0,70 \cdot 10^{-3} + \frac{30}{10^5}\,0,05 = 0,72 \cdot 10^{-3};$$

$$P_{пр.з} = 10^5 \cdot 706,5(0,19 \cdot 10^{-3} + 0,72 \cdot 10^{-3}) = 64,0 \cdot 10^3 \text{ кгс};$$

$$W_{пр.з}(0) = 2,56 - 11,5 \cdot 10^{-3} - 700 \cdot 0,19 \cdot 10^{-3} - 0,72 \cdot 10^{-3}(4,03 + 0,70) \times$$

$$\times 10^3 = -0,97 \text{ см}.$$

5. Так как осадка $W_{пр.з}(0)$ превышает допустимую величину, то координаты следующих точек графиков не определяли

$$\Delta_{пр.з} = 0,8 - \left(\frac{64 \cdot 10^3 \cdot 100}{10^5 \cdot 706,5} + \frac{64 \cdot 10^3 \cdot 33}{10^5 \cdot 706,5}\right) = 0,7 \text{ см}.$$

Построив по результатам вычислений графики, можно найти значения $P^н$, соответствующее осадке Δ;

$P^н = 53 \cdot 10^3$ кгс;

$P_{расч.} = 53 \cdot 10^3 \cdot 1,2 = 63,6 \cdot 10^3$ кгс.

$\Phi = 68,1 \cdot 10^3$ кгс (подсчет не приводится).

6. Так как $68,1 \cdot 10^3 > 63,6 \cdot 10^3$, то к свае можно приложить нагрузку 63,6 тс.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

При строительстве наземных сооружений на вечномерзлых грунтах в районах Сибири и Крайнего Севера сваи получили широкое распространение. Однако эффективность их применения снижается вследствие недостаточно полного учета вопросов, связанных с прогнозированием осадок одиночных центрально нагруженных свай.

В практике строительства нередки случаи, когда осадки свай достигают величин, опасных для нормальной эксплуатации опирающихся на них сооружений. Эти величины регламентированы СНиПом П-Б.I-62[X]. Из-за недостаточной разработки метода расчета по второму предельному состоянию (по деформациям) осадки свай определяют методом пробных испытаний на конкретной строительной площадке. Этот метод трудоемок, требует значительных материальных затрат и не всегда дает достаточно достоверные результаты, так как температура мерзлого грунта в процессе испытаний не остается постоянной.

В связи с вышеизложенным, во ВНИИСТе лабораторией трубопроводов, сооружаемых в особых условиях, были проведены исследования напряженно-деформированного состояния одиночных центрально-нагруженных свай, погруженных в мерзлые грунты. Результаты исследований были положены в основу настоящего Руководства.

При разработке аналитических зависимостей грунт вдоль сваи рассматривали как идеальную упруго-пластическую среду, в которой между боковой поверхностью сваи и мерзлым грунтом могут быть установлены упругие, упруго-пластические или пластические связи.

Упругая связь наблюдается в том случае, когда грунт и свая на поверхности контакта между ними под влиянием нагрузки, приложенной к свае, деформируются на одинаковую величину, между сваей и грунтом существует полное прилипание. После снятия нагрузки свая должна вернуться в исходное положение за счет упругих сил, возникающих в грунте. Подобная схема работы системы "свая-грунт" условна, т.к. грунт не является абсолютно упругим

телом, однако эта схема позволяет с достаточной для практических расчетов точностью использовать весьма простую зависимость

$$\tau(z) = -k_t w(z),$$

где $\tau(z)$ – интенсивность касательных напряжений в грунте у поверхности сваи в сечении, расположенном на расстоянии z от начала координат;

$w(z)$ – вертикальное смещение грунта у поверхности сваи в сечении, расположенном на расстоянии z от начала координат;

$k_t(z)$ – коэффициент сдвига сваи в грунте на расстоянии z от начала координат.

Пластическая связь наступает после нарушения контакта между сваей и грунтом, а именно с момента начала скольжения сваи относительно прижимающей к ней грунтовой среды. При аналитических исследованиях было принято, что для элементарного участка поверхности сваи непосредственно перед проскальзыванием напряжения составляют $\tau_{пр.}$, а после проскальзывания $\gamma\tau_{пр.}$ Коэффициент $\gamma < 1$ показывает долю уменьшения предельных касательных напряжений по контуру сваи после смещения сваи относительно прилегающего грунта.

Упруго-пластическая связь может наблюдаться в том случае, если вдоль сваи имеются участки с упругой и пластической связью между ее стволом и грунтом.

Нижний торец сваи рассматривали как заглубленный абсолютно жесткий плоский штамп. При исследовании напряженно-деформированного состояния сваи учитывали две фазы деформирования грунта под ее подошвой: первая фаза, характеризующаяся линейной зависимостью между осадками штампа и напряжениями, и вторая фаза, при которой происходит сдвиги грунта из-под нижнего торца в стороны – вниз с одновременным уплотнением грунта. Для вмороженных свай осадки подошвы сваи при первой фазе работы грунта определяли согласно формулы Буссинеска, а при второй – по формулам Б.В. Бахолдина.

Решения были получены для свай, погруженных в однослойные и двухслойные мерзлые грунты с изменяющейся по глубине температурой. Было принято, что коэффициент $k_t(z)$ изменяется с глубиной по линейной зависимости:

$$k_t(z) = k_н + k_{\frac{z}{l}},$$

а величина нормативного сопротивления мерзлых грунтов сдвигу по боковой поверхности смерзания - по степенной зависимости (2).

Для проверки полученных аналитических зависимостей на опытно-экспериментальной базе ВНИИСТа были проведены опыты со стальными трубчатыми сваями диаметром 102 мм и с моделями жестких и упругих свай на поляризационно-оптических установках. Для оценки масштабного фактора и более объективной оценки аналитические решения были сопоставлены с результатами испытаний свай, проведенных в лабораторных и полевых условиях А.А. Жигульским, К.Е. Егоровым, Г.Н. Максимовым. Анализ показал, что аналитические зависимости соответствуют напряженно-деформированному состоянию одиночных центрально нагруженных свай, вмороженных в мерзлые грунты.

Значения коэффициента k_t были получены экспериментальными методами. Эксперименты проводили на опытно-экспериментальной базе ВНИИСТа с моделями свай, погруженными в мерзлые грунты при температурах -2,5 - -5,0°С. Эти значения удовлетворительно согласуются с данными полевых испытаний, проведенных в различных грунтовых условиях.

Величину коэффициента γ определяли как частное от деления величины $R^н_{cg}$, приведенной в табл.5 СНиПа П-Б.6-66, на сумму ($R^н_{cg} + C_{эк}$). Значения $C_{эк}$ принимали согласно данным, приведенным в работе В.В.Докучаева (Расчет свайных фундаментов на вечномерзлых грунтах по предельным состояниям. Л., Стройиздат, 1968).

Коэффициенты получили заниженными по сравнению с данными экспериментов, проведенных на опытно-экспериментальной базе ВНИИСТа с моделями свай при температурах -2,5 - -5,0°С. Однако это занижение идет в запас прочности, а использование описанного выше метода позволяет определить значения γ в более широком интервале температур.

При определении величин коэффициента Пуассона и модуля деформации для мерзлых грунтов были использованы результаты экспериментальных исследований Н.А. Цытовича, С.С. Вялова, А.А.Бродской, К.Е. Егерева, А.А. Жигульского.

Как показывают испытания свай в полевых и лабораторных условиях, значения $R^н$ (нормативных сопротивлений мерзлых грунтов нормальному давлению), приведенные в СНиП П-Б.6-66, в ряде

случаев оказываются значительно заниженными. Это занижение объясняется тем, что величину реакции грунта под концом сваи определяли при экспериментальных исследованиях в полевых условиях как разницу между предельными вдавливающими и выдергивающими нагрузками, приложенными к сваям с примерно одинаковыми размерами. Значения предельных нагрузок определяли из графиков "осадка-нагрузка" (или "перемещение-нагрузка") методом построения этих графиков в логарифмических координатах.

При недостаточной разработке методов расчета свай по деформациям, этот метод являлся вынужденной мерой, твердо гарантирующей отсутствие в основании сооружений значительных неравномерных осадок. Полученные таким способом предельные нагрузки, как правило, соответствовали моменту полного срыва сваи по боковой поверхности. Как показывает анализ результатов экспериментов, в этот момент усилия в нижнем торце значительно меньше усилий, возникающих в подошве свай при дальнейшем увеличении нагрузки.

Таким образом, включенные в СНиП П-Б.6-66 значения $R^н$ часто оказываются заниженными, и их использование для расчета центрально нагруженных свай по предельным состояниям может привести к искажению результатов и существенной недогрузке свай. В связи с вышеизложенным на основании разработанной методики прогнозирования осадок сваи предлагается повысить значения нормативных сопротивлений мерзлых грунтов до нормального давления в 1,6-1,8 раз и определять значения критических напряжений в грунте под подошвой сваи по формуле

$$\sigma_{кр} = 1{,}8R^н - 0{,}8\gamma_{o\,ср}(\ell + \ell_{g.c.}).$$

Изложенный в настоящем Руководстве метод расчета центрально нагруженных свай дает возможность увеличить их несущую способность и не допустить развитие осадок, опасных для сооружений, опирающихся на свайный фундамент.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Общие положения 3
2. Расчет по предельным состояниям 6
Приложения 27

Руководство по расчету
центрально нагруженных свай в вечномерзлых
грунтах
Р 162-74
Издание ЦНТИ ВНИИСТа

Редактор Т.Я. Разумовская Корректор Ф.д.Остаева
Технический редактор Т.В. Беремева

Д-42498	Подписано в печать 26.П.1975 г.	Формат 60х84/16
Печ.л. 3,25	Уч.-изд.л. 2,5	Усл.печ.л. 3,0
Тираж 500 экз.	Цена 25 коп.	Заказ 74

Ротапринт ВНИИСТа

gost.e-ecolog.ru