



УДК 624.131.522:691.4

**Мирсаяпов Илизар Талгатович**

доктор технических наук, профессор

E-mail: [mirsayapov1@mail.ru](mailto:mirsayapov1@mail.ru)

**Сабирзянов Даниль Дамирович**

аспирант, ассистент

E-mail: [danil198900@mail.ru](mailto:danil198900@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Несущая способность основания фундаментов при комбинированных, чередующихся, длительно статических и циклических нагрузениях**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Существующие методы расчета по несущей способности и деформациям, в основном, разработаны для кратковременного статического или циклического нагружений, с учетом, что данные нагружения постоянны на все время строительства и эксплуатации здания или сооружения, и которые не в состоянии учитывать особенности деформирования оснований фундаментов при комбинированных, чередующихся, длительно статических и циклических нагружениях.

Цель исследования – усовершенствование метода аналитического расчета несущей способности, учитывая изменения деформационных и прочностных свойств глинистых грунтов в условиях трехосного напряженного состояния, при комбинированных, чередующихся, длительно статических и циклических нагружениях.

*Результаты.* По результатам экспериментальных исследований, получены графические и аналитические формы описания изменения исходных и трансформированных диаграмм деформирования глинистых грунтов при комбинированных, чередующихся, циклических и длительно статических нагружениях, изменение прочностных и деформационных свойств грунтов.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в разработанном уравнении предельной несущей способности грунтового основания при комбинированных, чередующихся, длительно статических и циклических нагружениях, учитывающие одновременное изменение реологических и прочностных характеристик грунтов, процесс упрочнения, а также режимы нагружения.

**Ключевые слова:** трехосное сжатие, глинистые грунты, статическое нагружение, циклическое нагружение, комбинированное нагружение, несущая способность, трансформированная диаграмма, прочность, удельное сцепление, упрочнение.

#### **Введение**

В действующих нормах проектирования существующие методы расчета по несущей способности и деформациям, в основном, разработаны для кратковременного статического или циклического нагружений, с учетом, что данные нагружения постоянны на все время строительства и эксплуатации здания или сооружения. Однако, принятые нормативные аналитические расчеты не в состоянии учитывать особенности деформирования оснований фундаментов при последовательном чередовании длительно статических и циклических нагружений. Особенно актуальны эти вопросы для оснований, сложенных глинистыми грунтами, обладающими ярко выраженными реологическими свойствами.

В глинистых грунтах, в случае режимного нагружения, напряженно-деформированное состояние меняется от приложенных количеств циклических нагружений и времени выдержки под действием длительно статической нагрузки, а также зависит от изменения прочностных и деформативных свойств грунтов в предыдущих блоках нагружения.

Исходя из этого, возникает необходимость модернизации метода аналитического расчета несущей способности учитывая изменения деформационных и прочностных свойств глинистых грунтов в условиях трехосного напряженного состояния при комбинированных, чередующихся, длительно статических и циклических нагружениях.

В нормах проектирования (СП 22.13330.2016), оценка предельной несущей способности основания в случаи кратковременного статического нагружения выполняется по следующей формуле:

$$N_u = b \cdot l \cdot (N_\gamma \xi_\gamma b' \gamma_1 + N_q \xi_q \gamma_1' d + N_c \xi_c c_1), \tag{1}$$

где  $N_\gamma, N_q, N_c$  – безразмерные коэффициенты несущей способности грунта под подошвой фундамента, зависящие от угла внутреннего грунта  $\varphi_i$ ;

$\xi_\gamma, \xi_q, \xi_c$  – коэффициенты, зависящие от соотношения длины и ширины поперечного сечения;

$l$  и  $b$  – приведенная длина и ширина фундамента, м;

$\gamma_1, \gamma_1'$  – удельный вес грунта под подошвой фундамента.

Как видно из формулы (1), значения предельного расчетного сопротивления и предельной несущей способности зависят от угла внутреннего трения  $\varphi_i$  и удельного сцепления  $c_i$  грунта.

Для глинистых грунтов, обладающих реологическими свойствами, угол внутреннего трения  $\varphi_i$  и удельное сцепление  $c_i$  не являются постоянными величинами, а зависят от времени действия длительно статического напряжения, от количества приложенной циклической нагрузки и от действия режимного комбинированного длительно статического и циклического напряжения.

### Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований

Проведены экспериментальные и теоретические исследования глинистого грунта нарушенной структуры при статических, циклических и комбинированных, длительно статических и циклических нагружениях в условиях трехосного сжатия, со следующими характеристиками:  $W=23\%$ ;  $W_p=22,8\%$ ;  $W_L=40,1\%$ ;  $\rho=1,94 \text{ г/см}^3$ ;  $I_p=17,3\%$ ;  $I_L=0,012$ .

По результатам экспериментальных исследований получены графические и аналитические зависимости изменения прочностных и деформационных характеристик глинистого грунта нарушенной структуры при кратковременных статических, циклических, длительно статических и комбинированных нагружениях.

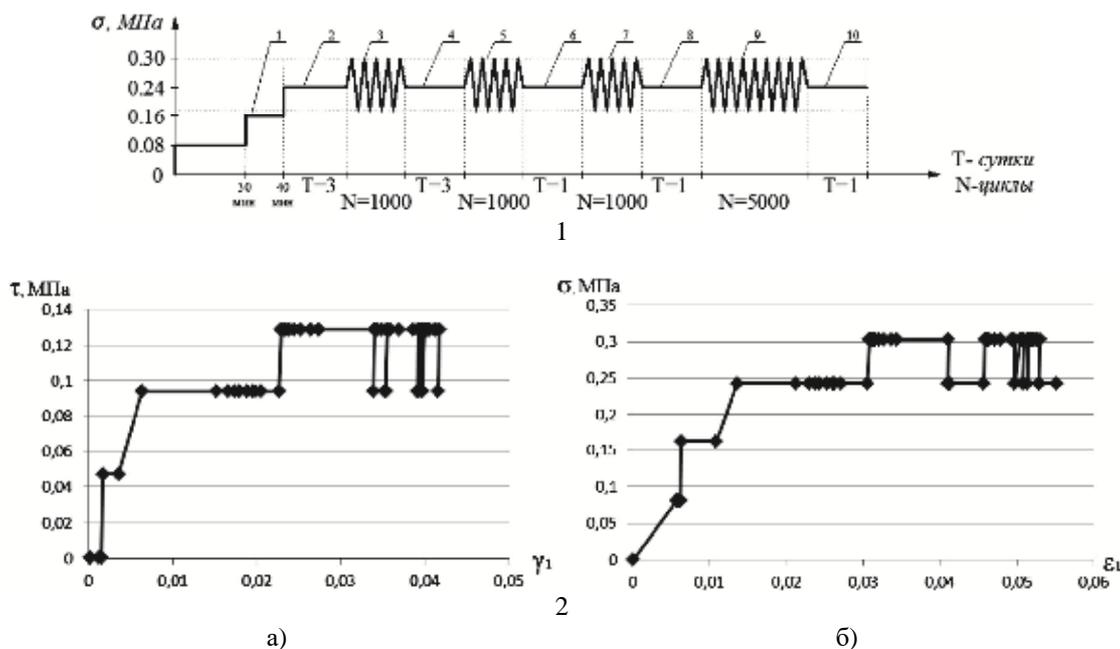


Рис. 1. 1) Режим нагружения; 2) Графики зависимости при режимном нагружении:  
 а) касательного напряжения от деформации сдвига;  
 б) вертикального напряжения от вертикальной деформации

Анализируя результаты экспериментальных исследований глинистого грунта при комбинированных, чередующихся, длительно статических и циклических нагружениях (рис. 1-2), видно, что происходит изменение всех деформационных и прочностных параметров глинистого грунта. Следовательно, в качестве параметра, устанавливающего механическое состояние грунта при режимном нагружении, принимается аналитическая диаграмма деформирования грунта в координатах « $\sigma_I - \epsilon_I$ », « $\tau_I - \gamma_I$ » для трехосного сжатия, где  $\sigma_I, \epsilon_I$  – вертикальные напряжения и линейные деформации,  $\tau_I, \gamma_I$  – вертикальные предельные касательные напряжения и деформации сдвига, при трехосном сжатии).

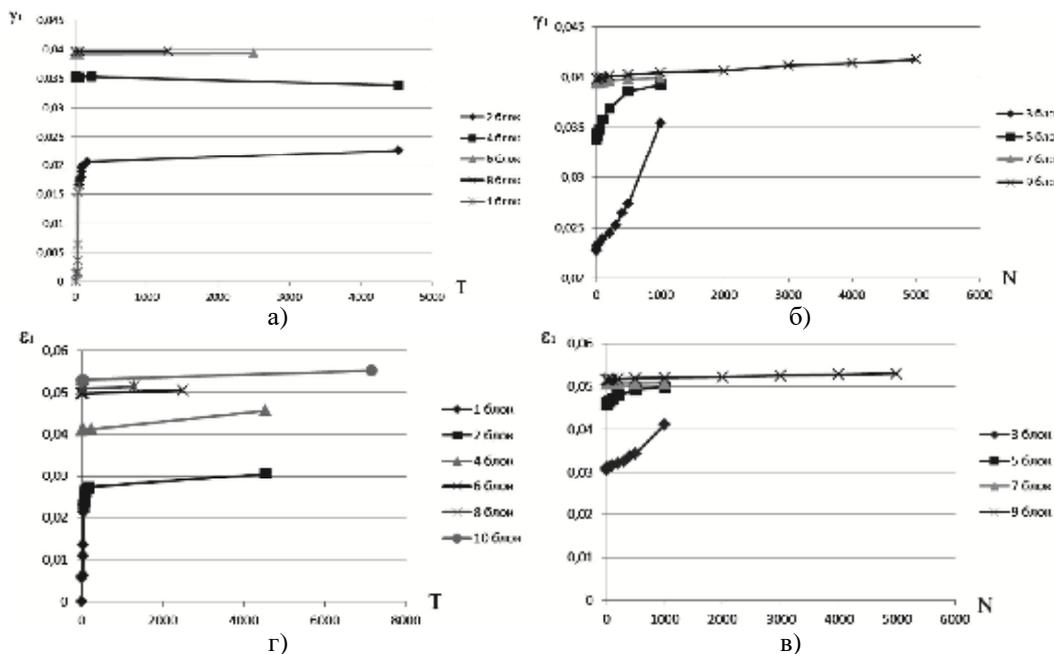


Рис. 2. Графики зависимости при режимном нагружении:  
 а) деформации сдвига от времени; б) деформации сдвига от циклов;  
 в) вертикальной деформации от времени; г) вертикальной деформации от циклов

**Аналитические схемы деформирования грунтов при трехосном сжатии**

Обобщая результаты экспериментальных исследований построены исходные диаграммы (диаграммы состояния) деформирования грунтов при кратковременном трехосном статическом нагружении в координатах  $\sigma_I - \epsilon_I$  и  $\tau_I - \gamma_I$  (рис. 3). Предельной точкой по координатам ( $\tau$ ) принимается величина предельного касательного напряжения  $\tau_I = \tau_{gr,us}$  и ( $\sigma_I$ ) величина предельного сопротивления грунта при трехосном кратковременном статическом нагружении. Предельной точкой по оси ординат ( $\gamma$ ) величина сдвиговой деформации  $\gamma_{ul} = 0,074$ , а величина линейной деформации ( $\epsilon$ ) принимается  $\epsilon_{ul} = 0,1$ .

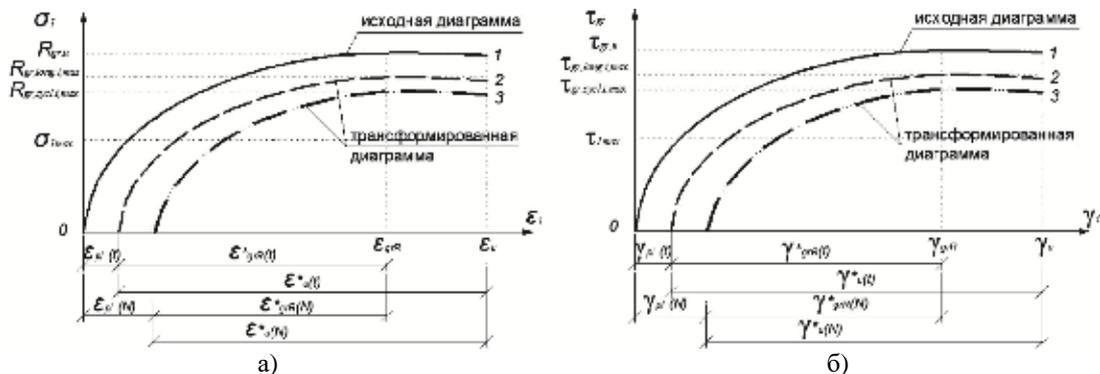


Рис. 3. Графики изменения исходных (1) и трансформированных (2, 3) диаграмм деформирования грунта при нагружениях:  
 1) кратковременном статическом; 2) длительно статическом; 3) циклическом

Модернизируя исходную диаграмму состояния, получают уравнения описывающие диаграмм деформирования глинистого грунта при трехосном длительно статическом нагружении. Трансформированные диаграммы принимаются аналогично исходной диаграмме состояния исходя из следующих положений (рис. 3):

- максимально допустимыми значениями вертикального касательного и нормального напряжения, в вершине диаграммы принимается касательное и нормальное напряжение в грунте, которая равняется пределу длительного сопротивления при трехосном нагрузки  $\tau_{gr,long}(t,\tau)$ ,  $R_{gr,long}(t,\tau)$  и деформации, равные деформациям в вершине диаграммы состояния грунта при трехосном кратковременном статическом нагружении  $\gamma_{gru,red} = \gamma_{gru}$   $\varepsilon_{gru,red} = \varepsilon_{gru}$ ;

- максимально допустимыми значениями по оси деформации определяющей границы диаграмм состояния, принимаются предельные деформации сдвига или вертикальные деформации ползучести при трехосном циклическом нагружении  $\gamma_{gr,red} = \gamma_{gr,R}$   $\varepsilon_{gr,red} = \varepsilon_{gr,R}$  а по основным зависимостям (2, 3) вычисляются напряжения в грунте;

- начала координат диаграмм принимаются смещенными на величину, равную деформации сдвиговой ползучести  $\gamma_{pl}(t)$  (4) или вертикальным деформациям  $\varepsilon_{pl}(t)$  (5) в наблюдаемый момент времени – при длительно статическом нагружении.

Уравнение максимально допустимого значения в вершине диаграммы состояния при трехосном длительно статическом нагружении имеет следующий вид:

- вертикального касательного напряжения и временем нагружения:

$$\tau(t|t_0) = \tau_{gr,long} = -\alpha \ln(t) + \tau_{gr,u}; \quad (2)$$

- вертикального давления и временем нагружения:

$$\sigma(t|t_0) = R_{gr,long} = -\alpha \ln(t) + R_{gr,u}; \quad (3)$$

где  $\alpha$  – значения, полученные опытным путем.

Деформации сдвиговой ползучести грунта в момент времени при длительно статическом нагружении принимается следующий вид уравнения:

$$\tau_{pl}(t|t_0) = c_{\infty}(t|\tau) \cdot \tau^{max}(t|t_0) \cdot f(t|t_0) \cdot k_{\gamma}(t); \quad (4)$$

Деформации ползучести грунта в рассматриваемый момент времени при длительно статическом нагружении определяются по формуле:

$$\varepsilon_{pl}(t|t_0) = c_{\infty}(t|\tau) \cdot \sigma^{max}(t|t_0) \cdot f(t|t_0) \cdot k_{\varepsilon}(t); \quad (5)$$

где  $f(t|t_0) = 1 - e^{-\gamma(t-t_0)}$  – функция роста деформации ползучести;

$\gamma$  – параметр ползучести грунта;

$k_{\gamma}(t)$ ,  $k_{\varepsilon}(t)$  – коэффициент, учитывающий нелинейной ползучести деформации грунта;

$k_{\gamma}(t) = 1,8$ ,  $k_{\varepsilon}(t) = 1,6$  при первом блоке длительно статического нагружения от 1-3 суток (до циклического нагружения);

$k_{\gamma}(t) = 1,65$ ,  $k_{\varepsilon}(t) = 1,55$  при последующих блоках длительно статического нагружения;

$c_{\gamma}(t|t) = \frac{g_{pl}(t|t)}{t_{gr,u}(t|t)}$ ,  $c_{\varepsilon}(t|t) = \frac{e_{pl}(t|t)}{R_{gr,u}(t|t)}$  – предельная мера ползучести грунта в момент

времени  $t$ .

Таким же образом, модернизируя исходную диаграмму состояния, получают уравнения описывающие диаграмм деформирования глинистого грунта при трехосном циклическом нагружении. Трансформированные диаграммы принимаются аналогично исходной диаграмме состояния исходя из следующих положений (рис. 3):

- максимально допустимыми значениями вертикального касательного и нормального напряжения, в вершине диаграммы принимается касательное и нормальное напряжение в грунте, которая равняется пределу длительного сопротивления при трехосном нагрузки  $\tau_{gr,cycl}(t,\tau)$ ,  $R_{gr,cycl}(t,\tau)$  и деформации, равные деформациям в вершине диаграммы состояния грунта при трехосном циклическом нагружении:

$$\gamma_{gru,red} = \gamma_{gru} \quad \varepsilon_{gru,red} = \varepsilon_{gru};$$

- максимально допустимыми значениями по оси деформации определяющей границы диаграмм состояния, принимаются предельные деформации сдвига или вертикальные деформации ползучести при трехосном циклическом нагружении  $\gamma_{gr,red} = \gamma_{gr,R}$   $\varepsilon_{gr,red} = \varepsilon_{gr,R}$  а по основным зависимостям (6, 7) вычисляются напряжения в грунте;

- начала координат диаграмм принимаются смещенными на величину, равную деформации сдвиговой виброползучести  $\gamma_{pl}(N)$  (8) или вертикальным деформациям виброползучести  $\varepsilon_{pl}(N)$  (9) в наблюдаемый цикл нагружения – при циклическом нагружении.

Уравнение максимально допустимого значения в вершине диаграммы состояния при трехосном циклическом нагружении имеет следующий вид:

- вертикального касательного напряжения и количеством циклов нагружения:

$$\tau(t_1\tau) = \tau_{gr,cycl}(N) = \tau_{gr,u} \cdot e^{-\beta N}; \tag{6}$$

- вертикального давления и количеством циклов нагружения:

$$\sigma(t_1\tau) = R_{gr,cycl}(N) = R_{gr,u} \cdot e^{-\beta N}, \tag{7}$$

где  $\beta$  – значения полученные опытным путем;

$N$  – количество циклических нагружений.

Деформации сдвиговой ползучести грунта в наблюдаемый цикл при циклическом нагружении принимается следующий вид уравнения:

$$g_{pl}(N) = \frac{c_{\#}(t_1t) \times s^{\max}(t_1t) \times f(N) \times k_g(N) \times \rho}{k_r}. \tag{8}$$

Деформации ползучести грунта в рассматриваемый цикл при циклическом нагружении определяются по формуле:

$$e_{pl}(N) = \frac{c_{\#}(t_1t) \times s^{\max}(t_1t) \times f(N) \times k_e(N) \times \rho}{k_r}, \tag{9}$$

где  $f(t_1t_0) = 1 - e^{-\gamma \frac{(N-N_{i-1})}{N_{i-1}}}$  – функция роста деформации сдвиговой ползучести;

$\gamma$  – параметр сдвиговой ползучести грунта при циклическом нагружении;

$k_r(N), k_e(N)$  – коэффициент, зависящий от нелинейных деформации ползучести грунта;

$k_r(N) = 1,8, k_e(N) = 1,37$  при циклическом нагружении до 1000 циклов;

$k_r(N) = 1,65, k_e(N) = 1,25$  при циклическом нагружении после 1000 циклов;

$\rho$  – асимметрия цикла вертикального напряжения грунта;

$k_p$  – коэффициент, зависящий от  $\rho$ ;

$$c_{\#}(t_1t) = \frac{g_{pl}(t_1t)}{t_{gr,u}(t_1t)}, \quad c_{\#}(t_1t) = \frac{e_{pl}(t_1t)}{R_{gr,u}(t_1t)} \text{ – предельная мера ползучести грунта.}$$

Для аналитического описания диаграмм деформирования (состояния) грунта при комбинированных, чередующихся, циклических и длительно статических нагружениях трансформируют зависимости (2-9) для трехосного циклического и длительно статического нагружения (рис. 4). При описании деформации ползучести грунта при режимном нагружении, следует принимать в расчет влияние вертикального давления ( $\sigma_1$ ) предыдущего блока на прочность, модуль деформации, модуль сдвига и относительные вертикальные деформации в вершине диаграммы при последующем нагружении после перехода в другой режим.

В каждом блоке, изменение диаграмм деформирования описывается по тем же формулам, что и при длительно статическом или циклическом нагружении, но подходящими для каждого блока  $\sigma_{1i}, \tau_{1i}, N_i$  или  $T_i$  и при условии изменении прочностных и деформационных параметров прочности и деформируемости в минувших блоках нагружения.

В каждом новом блоке, в зависимости от вида нагружения, совершается последующее трансформирование диаграммы состояния грунта, при этом, исходной для каждого блока из них принимается трансформированная диаграмма в конце предыдущего блока.

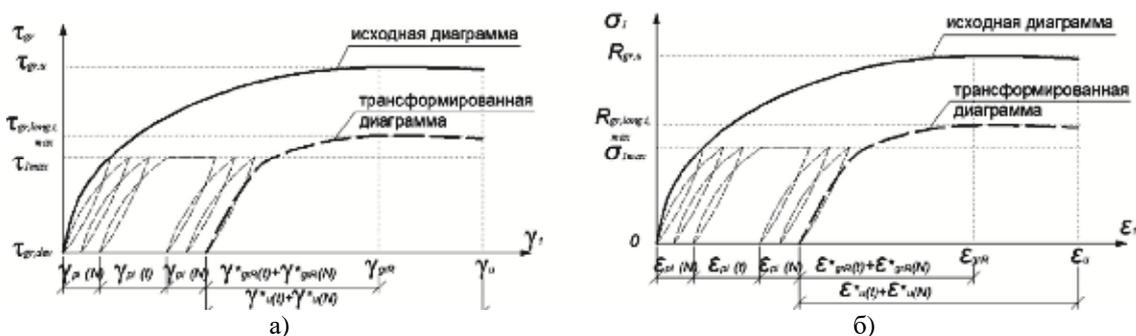


Рис. 4. Графики изменения исходных и трансформированных диаграмм деформирования грунта при комбинированном, длительно статическом и циклическом нагружении

Исходя из полученных экспериментальных и теоретических исследований, на рис. 5 приведены изменения предельного касательного напряжения при трехосном кратковременном статическом, длительно статическом, циклическом и при комбинированном, чередующихся длительно статических и циклических нагружениях. Из графиков видно, что предельное касательное напряжение глинистых образцов при комбинированном нагружении существенно отличается от предельных касательных напряжений при длительно статическом и циклическом нагружениях.

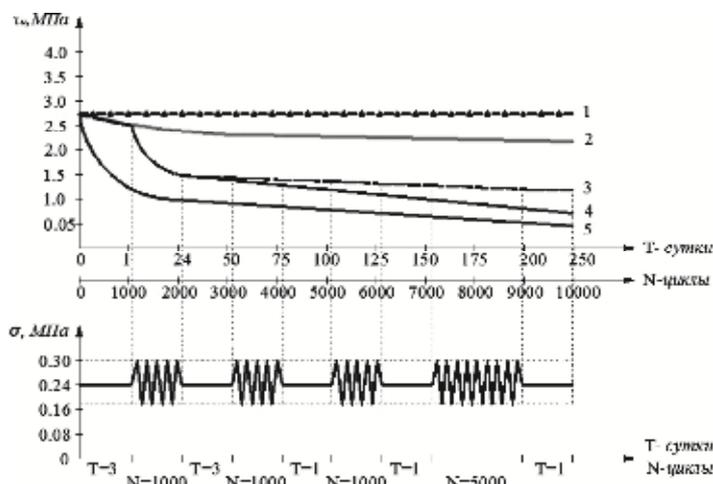


Рис. 5. График изменения предельного касательного напряжения при трехосном сжатии глинистого грунта с боковым давлением 0,08 МПа: 1 – при кратковременном статическом нагружении; 2 – при длительно статическом нагружении; 3 – при комбинированном длительно статическом и циклическом нагружении с учетом упрочнения грунта; 4 – при комбинированном, длительно статическом и циклическом нагружении без учета упрочнения грунта; 5 – при циклическом нагружении

**Методика расчета**

Определив аналитическим путем предельное касательное напряжение и деформации сдвиговой ползучести глинистых грунтов при циклическом, длительно статическом и комбинированном нагружении, условие прочности принимается по закону Кулона-Мора:

$$\tau_{ult}(N, T) = \sigma_1(N, T) \cdot \text{tg} \varphi(N, T) + c(N, T, \tau), \tag{10}$$

где  $\varphi(N, T)$ ,  $c(N, T, \tau)$  – прочностные характеристики глинистого грунта при комбинированном длительно статическом и циклическом нагружении (угол внутреннего трения и удельное сцепление);

$\sigma(N, T)$  – нормальное максимальное вертикальное напряжение.

На графиках 6, 7 и 8 показаны изменения прочностных характеристик глинистого грунта при циклических, длительно статических и комбинированных чередующихся длительно статических и циклических нагружениях. Из графиков видно, что снижение прочностных параметров происходит в основном за счет уменьшения удельного сцепления  $c$ , тогда как угол внутреннего трения  $\varphi$  уменьшается незначительно.

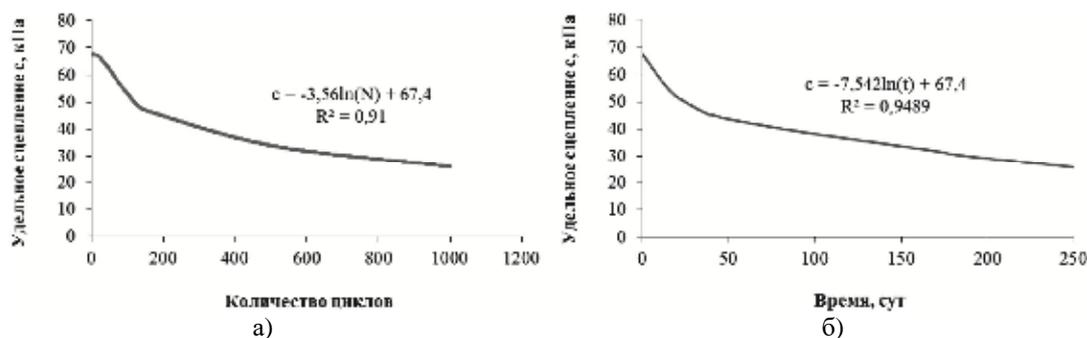


Рис. 6. Графики изменения удельного сцепления грунта при: а) циклическом нагружении; б) длительно статическом нагружении

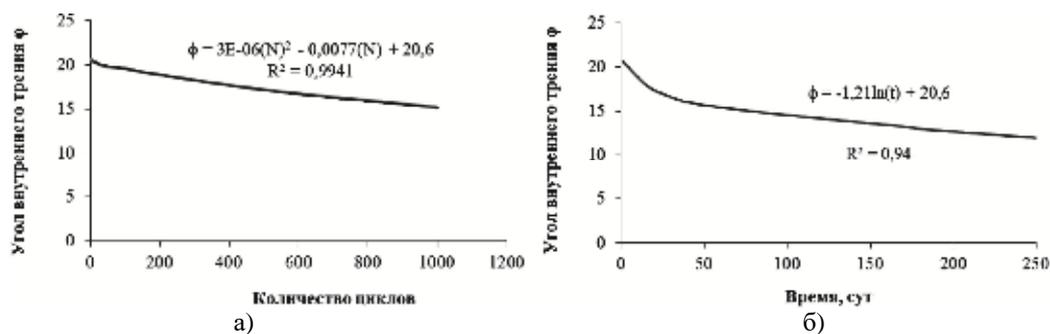


Рис. 7. Графики изменения угла внутреннего трения грунта при:  
а) циклическом нагружении; б) длительно статическом нагружении

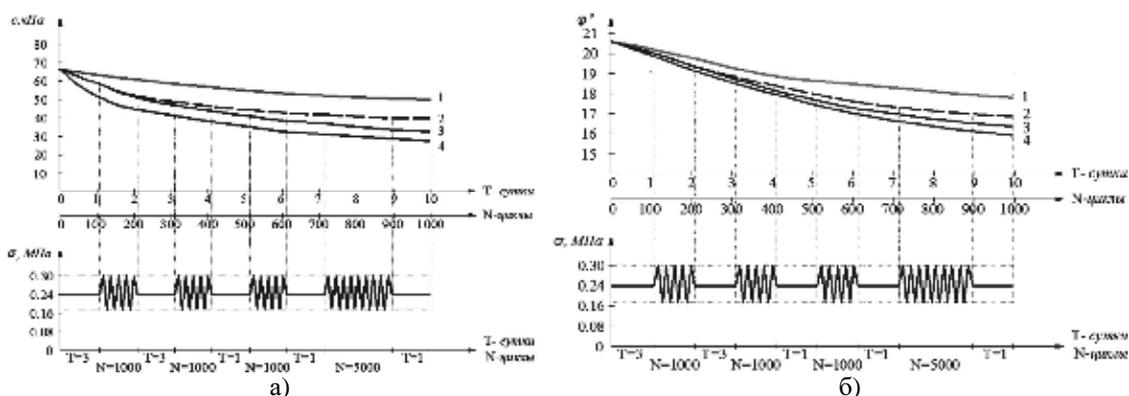


Рис. 8. Изменение прочностных характеристик глинистого грунта при трехосном нагружении:  
а) удельное сцепление; б) угол внутреннего трения;

1) длительно статическом нагружении; 2) комбинированном чередующихся длительно статических и циклических нагружениях с учетом упрочнения грунта; 3) комбинированном чередующихся длительно статических и циклических нагружениях без учета упрочнения грунта; 4) циклическом нагружении

Исходя из результатов проведенных экспериментальных исследований (рис. 8), удельное сцепление при комбинированном чередующихся циклических и длительно статических нагружениях без учета упрочнения грунтов представляется в следующем виде:

$$c(N, T, t) = c_0 - \prod_{i=1}^n Dc(N) \pm \prod_{j=1}^n Dc(T), \tag{11}$$

где  $c_0$  – начальное удельное сцепление грунта, соответствующее кратковременному статическому нагружению;

$c(N)$  удельное сцепление грунта при циклическом нагружении;

$c(T)$  удельное сцепление грунта при длительно статическом нагружении;

Удельное сцепление грунта в рассматриваемый цикл при циклическом нагружении определяются по формуле:

$$\Delta c(N) = K_\epsilon(N) \Delta \epsilon^p(N) + K_\gamma(N) \Delta \gamma^p(N). \tag{12}$$

Удельное сцепление грунта в рассматриваемый момент времени при длительно статическом нагружении определяются по формуле:

$$\Delta c(T) = K_\epsilon(T) \Delta \epsilon^p(T) + K_\gamma(T) \Delta \gamma^p(T), \tag{13}$$

где  $K_\epsilon$  и  $K_\gamma$  – параметры для взаимосвязи между  $\Delta c$  и  $\Delta \epsilon$ ,  $\Delta \gamma$ , определяемые из эксперимента:

$$K_\epsilon = \Delta c / \Delta \epsilon, K_\gamma = \Delta c / \Delta \gamma.$$

Для вычисления  $K_\gamma$  воспользуемся трансформированными диаграммами состояния грунтов выполненных для режимного нагружения, где видно, как при изменении деформации сдвиговой ползучести грунта, снижается предельное касательное напряжение. По такому же принципу находим  $K_\epsilon$ , построив трансформированную диаграмму между вертикальным напряжением и деформацией ползучести.

Далее, рассмотрим процесс упрочнения глинистого грунта при комбинированных, чередующихся циклических и длительно статических нагрузениях. В глинистых грунтах в зависимости от режима, величины и длительности действия нагрузки возникают два друг друга компенсирующих процесса: упрочнение, которое происходит за счет самозалечивания трещин и перекомпоновкой частиц, а также разупрочнение, вызванное развитием трещин и переориентацией частиц [5, 7].

Результаты экспериментальных исследований подтвердили, что при комбинированном чередующихся длительно статических и циклических нагрузениях, за счет восстановления водно-коллоидных и структурных связей произошло увеличение упрочнения грунта от 5 % до 20 % (рис. 5 и 9).

С учетом выше изложенного путем обработки экспериментальных данных, был построен график изменения коэффициента упрочнения глинистого грунта при комбинированных, чередующихся, длительно статических и циклических нагрузениях (рис. 9).

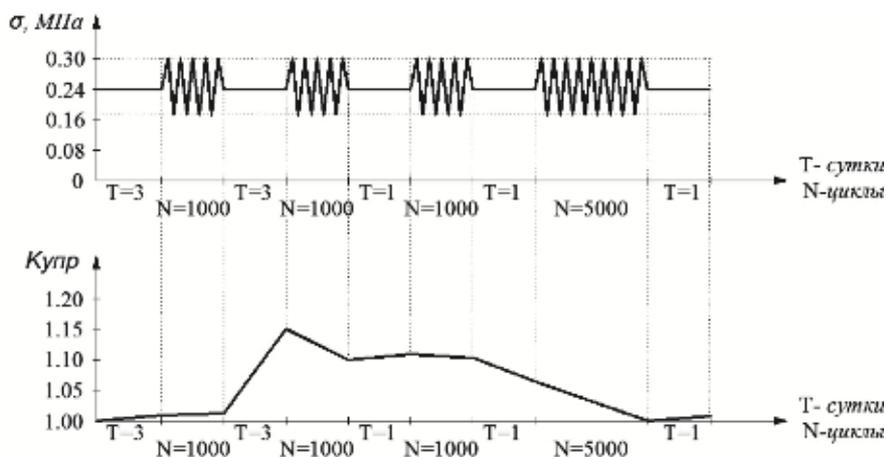


Рис. 9. График изменения коэффициента упрочнения глинистого грунта при комбинированных, чередующихся, длительно статических и циклических нагрузениях

Учитывая упрочнение глинистого грунта, при комбинированном чередующихся циклических и длительно статических нагрузениях, изменение удельного сцепление грунта в определенном интервале нагружения определяется по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
 Dc(N, T, t) = & \left( \prod_{i=1}^n (K_e(N, T)) \times \prod_{j=1}^n \left( \frac{c_{\varphi}(t_1 t)}{k_r} \times \frac{\max(t_1 t) \times f(N) \times k(N) \times \tau}{k_r} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + c_{\varphi}(t_1 t) \times \frac{\max(t_1 t_0) \times f(t_1 t_0) \times k(t)}{k_r} \right) + \right. \\
 & \left. + \prod_{k=1}^n (K_g(N, T)) \times \prod_{m=1}^n \left( \frac{c_{\varphi}(t_1 t)}{k_r} \times \frac{\max(t_1 t) \times f(N) \times k(N) \times \tau}{k_r} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + c_{\varphi}(t_1 t) \times \frac{\max(t_1 t_0) \times f(t_1 t_0) \times k(t)}{k_r} \right) \times \frac{1}{k_{ynp}} \right)
 \end{aligned} \tag{14}$$

где  $K_{ynp}(N, T)$  – коэффициент упрочнения грунта при комбинированном нагружении, определяемая из графика 7.

Тогда удельное сцепление грунта при комбинированных, чередующихся, длительно статических и циклических нагрузениях определяются по формуле:

$$c(N, T, \tau) = c_0 - \Delta c(N, T, \tau). \tag{15}$$

Исходя из формулы (10), используя трансформированные диаграммы деформирования глинистого грунта (рис. 4) при режимном чередующихся длительно статических и циклических нагрузениях, зная удельное сцепление при таких нагрузениях, изменение угла внутреннего трения  $\varphi$  грунта, определяется из следующего уравнения:

$$j(N, T, t) = \arctg \frac{\sigma_{ult}(N, T) - c(N, T, t)}{s_1(N, T)} \cdot \frac{\sigma}{\tau} \tag{16}$$

Определив аналитическим образом прочностные характеристики  $\varphi(N, T, \tau)$  и  $c(N, T, \tau)$  при комбинированных, чередующихся, циклических и длительно статических нагрузениях, уравнение предельной несущей способности основания записывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 N_u = & b \cdot \lambda \cdot \varphi(N, T, \tau) \cdot \gamma_1 + N_q \cdot \gamma_q \cdot \gamma_f \cdot d + N_c \cdot \gamma_c \cdot \\
 & \cdot \left( c_0 - \left( \prod_{i=1}^n (K_{e_i}(N, T)) \cdot \prod_{j=1}^n \left( \frac{c_{\varphi_j}(t_1 t_0)}{k_r} \cdot \max(t_1 t_0) \cdot f(N) \cdot k(N) \cdot \tau \right) + \right. \right. \\
 & + c_{\varphi}(t_1 t_0) \cdot \max(t_1 t_0) \cdot f(t_1 t_0) \cdot k(t)) + \\
 & + \prod_{k=1}^n (K_{g_k}(N, T)) \cdot \prod_{m=1}^n \left( \frac{c_{\varphi_m}(t_1 t_0) \cdot \max(t_1 t_0) \cdot f(N) \cdot k(N) \cdot \tau}{k_r} + \right. \\
 & \left. \left. + c_{\varphi}(t_1 t_0) \cdot \max(t_1 t_0) \cdot f(t_1 t_0) \cdot k(t)) \right) \cdot \frac{1}{k_{ynp}} \right)
 \end{aligned} \tag{17}$$

Функция несущей способности грунта при режимном нагружении принимает вид:

$$\begin{aligned}
 N_g = & \frac{c_0}{\gamma_c} \cdot N_q - 1 \cdot \left( 0,29 + 0,47 \cdot \arctg \frac{c_{ult}(N, T) - c(N, T, t)}{s_1(N, T)} \right) \cdot \frac{c_{ult}(N, T) - c(N, T, t)}{s_1(N, T)} \\
 N_q = & t g^2 \cdot \frac{c_0}{\gamma_c} \cdot \left( 0,45 + \frac{j}{2} \cdot \frac{c_{ult}(N, T) - c(N, T, t)}{s_1(N, T)} \right) \cdot \frac{c_{ult}(N, T) - c(N, T, t)}{s_1(N, T)} \\
 N_c = & \frac{N_q - 1}{\arctg \frac{c_{ult}(N, T) - c(N, T, t)}{s_1(N, T)}} \cdot \frac{c_{ult}(N, T) - c(N, T, t)}{s_1(N, T)}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Для апробации, полученного уравнения предельной несущей способности основания, были проведены лотковые испытания глинистого грунта нарушенной структуры, с такими же характеристиками, что и для трехосных испытаний.

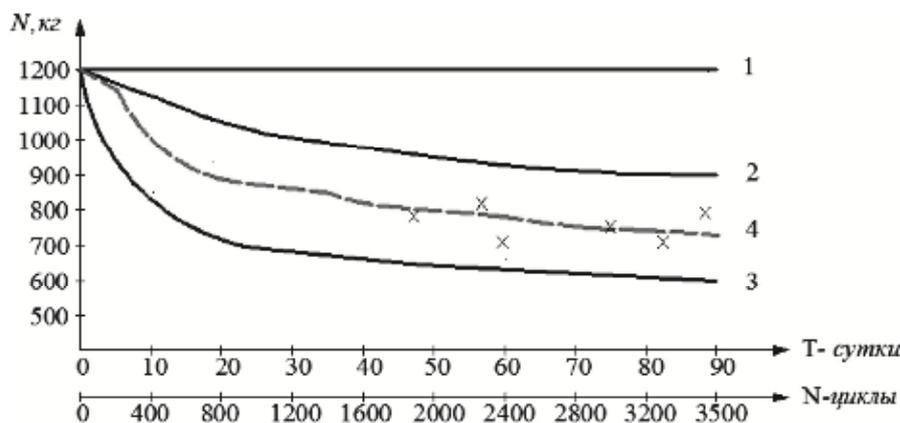


Рис. 10. Сопоставление предельной несущей способности плитного фундамента при комбинированном чередующимися длительно статических и циклических нагружениях.

Графики изменения предельной несущей способности при:

- 1) кратковременном статическом нагружении 2) длительно статическом нагружении;
- 3) циклическом нагружении; 4) по предложенной методике (17),
- x – экспериментальные значения при режимном нагружении с учетом упрочнения грунта

Из графика 10, наблюдается хорошая сходимость между расчетными значениями предельной несущей способности основания и опытными данными.

**Заключение**

Разработана уравнение предельной несущей способности грунтового основания при комбинированном чередующимися длительно статических и циклических нагружениях, учитывающие одновременное изменение реологических и прочностных

характеристик грунтов, процесс упрочнения, а также режимов нагружения.

Полученные уравнения адекватно описывают процессы происходящие в грунте при режимном нагружении, что подтверждается хорошим совпадением экспериментальных данных с предложенным уравнением.

### Список библиографических ссылок

1. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Несущая способность и осадки оснований фундаментов при длительном нагружении. Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сб. трудов Международной научной конференции; в 2 т. Т. 2. / МГСУ, Москва 2011. С. 342–347.
2. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Исследование прочности и деформативности глинистых грунтов при длительном трехосном сжатии // Известия КГАСУ. 2009. № 2 (12). С. 167–172.
3. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В., Сабирзянов Д. Д. Прочность и деформации глинистых грунтов при трехосном режимном чередующемся статическом и циклическом нагружении // Геотехника Беларуси: Наука и практика. 2013. С. 297–304.
4. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В., Сабирзянов Д. Д. Деформации глинистых грунтов при режимном комбинированном длительном и циклическом нагружении. Перспективные направления развития теории и практики в реологии и в механике грунтов. Материалы XIV Международного симпозиума по реологии / КГАСУ, Казань, 2014. С. 130–135.
5. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Прочность и деформируемость глинистых грунтов при режимном пространственном напряженном состоянии с учетом трещинообразования // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. № 1. С. 16–23.
6. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В., Сабирзянов Д. Д. Расчетная модель осадки основания фундаментов при режимном статико-циклическом нагружении // Известия КГАСУ. 2016. № 1 (35). С. 102–110.
7. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Влияние процесса упрочнения на прочность глинистого грунта при режимном трехосном нагружении // Известия КГАСУ. 2017. № 1 (39). С. 145–152.
8. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Prediction of deformations of foundation beds with a consideration of long-term nonlinear soil deformation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2011. Т. 48. № 4. С. 148–157.
9. Каюмов Р. А., Шакирзянов Ф. Р., Гаврюшин С. С. Моделирование процесса деформирования и оценка несущей способности системы грунт – тонкостенная конструкция // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. № 6. 2014. С. 20–24.

**Mirsayapov Pizar Talgatovich**

doctor of technical sciences, professor

E-mail: [mirsayapov1@mail.ru](mailto:mirsayapov1@mail.ru)

**Sabirzyanov Danil Damirovich**

post-graduate student, assistant

E-mail: [danil198900@mail.ru](mailto:danil198900@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Bearing capacity of foundations base under combined, alternating, long-term static and cyclic loading**

#### **Abstract**

*Problem statement.* The existing bearing capacity and deformations calculation methods are mainly designed for short-term static or cyclic loading with taking into account that the load

data is constant for the entire period of the building or structure construction and operation, which calculations are not able to take into account the base of foundations deformation features under a successive alternation of long static and cyclic loads.

The purpose of the study is improvement the bearing capacity analytical calculation method with taking into account changes in the clay grounds deformation and strength properties in conditions of a triaxial stress state under combined alternating long-term static and cyclic loading.

*Results.* Based on the results of experimental studies, graphical and analytical forms for described the results of changes in the initial and transformed clay grounds deformation diagrams under combined alternating cyclic and long-term static loads, the ground strength and deformation properties.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry is in the developed equation ultimate bearing capacity equation for combined alternating static and cyclic loads, which take into account the simultaneous change in the ground rheological and strength characteristics, the hardening process, and loading regimes.

**Keywords:** triaxial compression, clay ground, static loading, cyclic loading, combined loading, bearing capacity, transformed diagram, strength, specific cohesion, hardening.

### References

1. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Bearing capacity and sediments of foundations under long-term loading. // Integration, Partnership and innovation in building science and education : proceedings of the International scientific. Conf.; in 2 v. V.2. / MGSU, Moscow, 2011. P. 342–347.
2. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Investigation of the clay grounds strength and deformation with long-term triaxial compression // Izvestiya KGASU. 2009. № 2 (12). P. 167–172.
3. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V., Sabirzyanov D. D. Strength and deformation of clayey soils under triaxial regime alternating static and cyclic loading // Geotekhnika Belarusi: Nauka i praktika. 2013. P. 297–304.
4. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V., Sabirzyanov D. D. Deformations of clay soils under regime combined long-term and cyclic loading. Perspective directions in the development of theory and practice in rheology and in soil mechanics. Materials of the XIV International Symposium on Rheology / KGASU. Kazan. 2014. P. 130–135.
5. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V., Strength and deformability of clay soils under the regime of a spatial stress state with allowance for crack formation // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2016, № 1. P. 16–23.
6. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V., Sabirzyanov D. D. Calculation model of the basement basement sediment under regime static-cyclic loading // Izvestiya KGASU. 2016. № 1 (35). P. 102–110.
7. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V., Influence of the hardening process on the strength of clayey soil under regime triaxial loading // Izvestiya KGASU. 2017. № 1 (39). P. 145–152.
8. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V., Prediction of deformations of foundation beds with a consideration of long-term nonlinear soil deformation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2011. T. 48. № 4. P. 148–157.
9. Kayumov R. A, Shakirzyanov F. R., Gavryushin S. S. Modeling of the deformation process and evaluation of the load-bearing capacity of the soil system – thin-walled construction // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroyeniye. № 6. 2014. P. 20–24.