



УДК 624.131.522:691.4

**Мирсаяпов И.Т.** – доктор технических наук, профессор

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

**Королева И.В.** – кандидат технических наук

E-mail: [prepod-irina@ya.ru](mailto:prepod-irina@ya.ru)

**Сабирзянов Д.Д.** – аспирант

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

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

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

### **Расчетная модель осадки основания фундаментов при режимном статико-циклическом нагружении**

#### **Аннотация**

В статье представлены результаты экспериментальных и теоритических исследований глинистых грунтов оснований при трехосном длительно-статическом, циклическом и режимном статико-циклическом нагружении. Описаны исходные и трансформированные диаграммы деформирования глинистого грунта при длительно-статическом, циклическом и режимном длительном статико-циклическом нагружении. Результаты испытаний обработаны и приведены в виде графиков и использованы для сравнения с данными теоретических исследований. На основании полученных трансформированных аналитических диаграмм деформирования разработан инженерный метод расчета осадок оснований, в основу которого положен метод послойного суммирования с учетом изменения пространственного напряженно – деформированного состояния грунтов в процессе режимного статико-циклического нагружения. Приведены сравнения результатов трехосных испытаний с лотковыми испытаниями при длительно-статическом, циклическом и режимном длительном статико-циклическом деформировании глинистого основания плитного фундамента.

**Ключевые слова:** глинистые грунты, трехосное сжатие, статическое нагружение, циклическое нагружение, режимное статико-циклическое нагружение, расчетная модель, осадка, трансформированная диаграмма, аналитические зависимости, прочность, напряжения.

В реальных условиях строительства и эксплуатации нагрузка на грунтовое основание прикладывается поэтапно по мере возведения здания и сооружения. При этом этапе активного нагружения на стадии строительства переходят в этапы последовательного чередования длительного статического и циклического нагружения, если в здании или сооружении установлено оборудование, создающее динамическое воздействие на грунтовое основание. Максимальные и минимальные значения циклической нагрузки и длительной статической нагрузки зависят от технологии и режима эксплуатации оборудования. Однако существующие методы расчета не в состоянии учитывать особенности деформирования оснований фундаментов при таких нагружениях.

Исходя из этого, возникает необходимость разработки методики расчета оснований фундаментов при режимном статико-циклическом нагружениях. Эта задача особенно актуальна для оснований, сложенных глинистыми грунтами, так как в этом случае напряженно – деформированное состояние меняется со времени и зависят от истории предшествующего нагружения. Схема напряженного состояния основания и расчетная схема приведены [1].

В связи с вышеизложенным на кафедре «Оснований и фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии» в КГАСУ, были проведены экспериментальные исследования глинистого грунта, в условиях трехосного статического, циклического и режимного нагружения. Испытывались образцы глинистого грунта со следующими характеристиками:  $W=23\%$ ;  $W_p=22,8\%$ ;  $W_L=40,1\%$ ;  $\rho=1,94\text{ г/см}^3$ ;  $I_p=17,3\%$ ;  $I_L=33\%$ . Образцы близнецы подготавливались в соответствии с ГОСТ 30416-96.

По результатам экспериментальных исследований получены графические зависимости между интенсивностью касательных напряжений  $\tau_i$  и интенсивностью деформаций сдвига  $\gamma_i$ ; между осевыми напряжениями  $\sigma_z$  и осевыми деформациями  $\varepsilon_z$ ; между объемными напряжениями  $\sigma_m$  и объемными деформациями  $\varepsilon_v$ ; изменения линейного модуля  $E_{0z}$ , объемного модуля  $K_v$  и модуля сдвига  $G$  во времени [2-5].

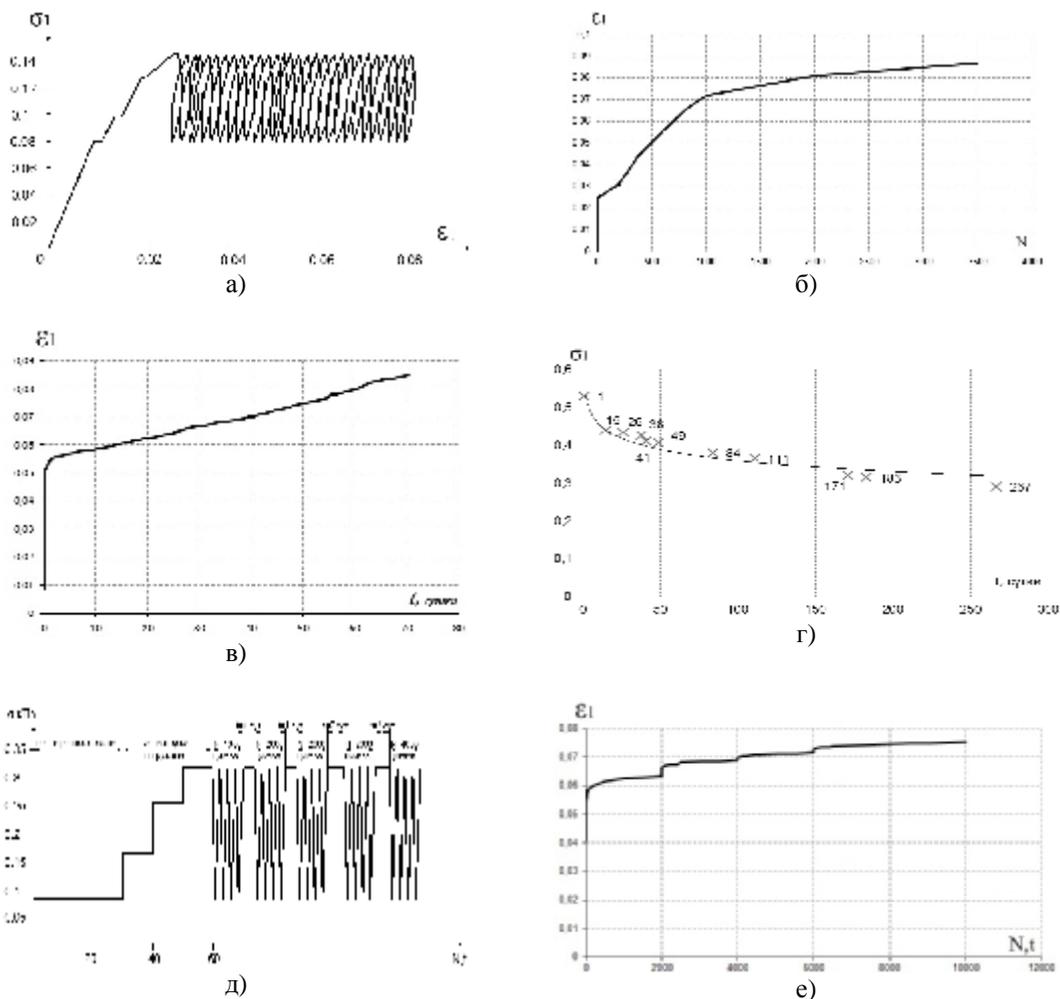


Рис. 1. Графики зависимости: а) зависимость вертикального напряжения от вертикальной деформации при трехосном кратковременном циклического нагружения; б) график развития вертикальной деформации от количества циклов при трехосном циклического нагружения; в) график развития вертикальной деформации при трехосном длительном статическом нагружении; г) зависимость вертикальных напряжений от времени при трехосном длительном статическом нагружении; д) режим нагружения при трехосном режимном длительном статическом и циклическом нагружениях; е) график развития вертикальной деформации при трехосном длительном статическом нагружении

На рис. 2 показаны изменения прочности при различных боковых давлениях 0,08 МПа и 0,16 МПа. На графиках приведены изменения прочности при трехосном кратковременном статическом, длительно статическом, кратковременном циклическом нагружении и точками показаны значения прочности при режимном трехосном длительно статическом и циклическом нагружениях. Из графиков видно, что прочность глинистых образцов при режимном статико-циклическом нагружении существенно отличается от прочности при длительно статическом и циклическом нагружении.

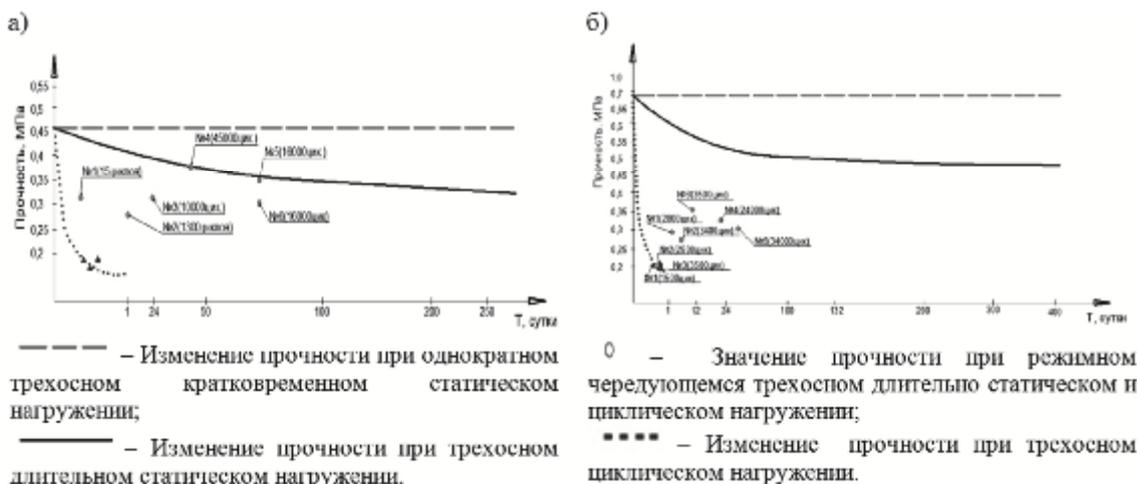


Рис. 2. Изменение прочности режимного нагружения:  
 а) при боковом давлении 0,08 Мпа; б) при боковом давлении 0,16 Мпа

Как видно из приведенных графиков при рассмотренных режимах происходит изменение всех оснований параметров, характеризующих напряженное и деформированное состояние грунтов во времени, что позволяет заключать о необходимости разработки нового параметра, характеризующего механическое состояние и необходимое для создания расчетных моделей. В качестве такого параметра принимается аналитическая диаграмма деформирования грунта в координатах « $\sigma_1-\epsilon_1$ » для трехосного сжатия (где  $\sigma_1, \epsilon_1$  — вертикальные напряжения (девиатор) и линейные деформации, при трехосном сжатии).

Исходя из полученных графиков (рис. 1, 2) были построены **исходные диаграммы** (диаграммы состояния) деформирования грунтов при кратковременном трехосном статическом нагружении. В качестве предельной точки по координатам ( $\sigma$ ) принимается величина временного сопротивления  $\sigma_1=R_{gr,u}$  (девиатора) грунта при трехосном кратковременном статическом сжатии. Предельной точкой по оси ординат ( $\epsilon$ ) принимается величина линейной деформации  $\epsilon_{u1}=0,0869$ . Вид диаграммы представлен на рис. 3.

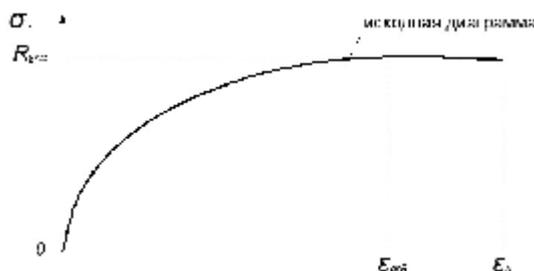


Рис. 3. Исходная диаграммы деформирования грунта при кратковременном трехосном статическом нагружении

При рассмотрении диаграмм состояния глинистого грунта при трехосном длительно статическом нагружении в качестве исходных использованы диаграммы деформирования « $\sigma_1-\epsilon_1$ » для случая трехосного кратковременного статического нагружения. Трансформируя исходную диаграмму состояния при трехосном кратковременном статическом нагружении, получают аналитические зависимости для описания диаграмм деформирования глинистого грунта при трехосном длительно статическом нагружении. По форме **трансформированные диаграммы** принимаются подобными исходной диаграмме состояния исходя из следующих положений (рис. 4 а):

- предельной точкой вертикального давления, в вершине диаграммы принимается напряжение в грунте, которая равняется пределу длительного сопротивления при трехосном действии нагрузки  $R_{gr,long}(t,\tau)$  и деформации, отвечающие деформациям в

вершине диаграммы состояния при трехосном кратковременном статическом нагружении  $\epsilon_{gr,red} = \epsilon_{gr,u}$ ;

- для предельной точки, определяющей границы диаграмм состояния по оси ординат, деформации равняются предельным деформациям при трехосном кратковременном статическом нагружении  $\epsilon_{gr,red} = \epsilon_{gr,R}$ , а по основным зависимостям (1) вычисляются напряжения в грунте;

- начала координат диаграмм принимаются смещенными на величину, равную деформациям ползучести в рассматриваемый момент времени:  $\epsilon_{pl}(t)$  – при длительном статическом нагружении.

- полученные углы наклона диаграмм деформирования принимается с учетом изменения модуля деформации глинистого грунта при трехосном длительно статическом нагружении.

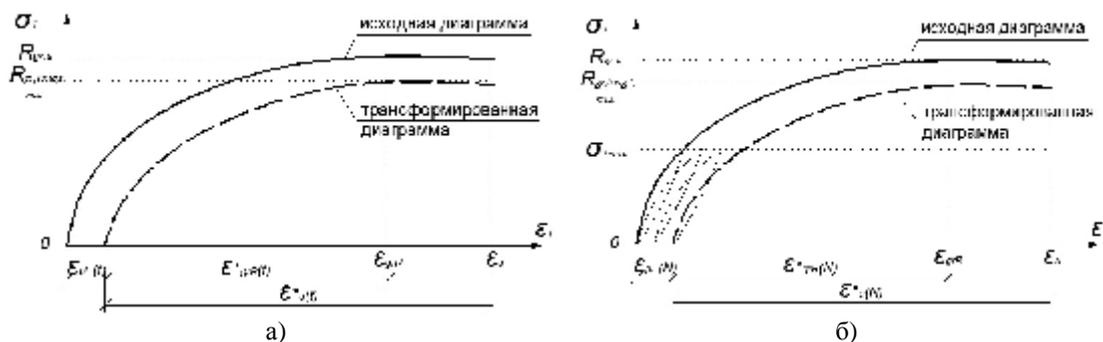


Рис. 4. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования грунта: а) при трехосном длительно статическом нагружении; б) при трехосном циклическом нагружении

Зависимость предельной точки вертикального давления (девиатора) в вершине диаграммы состояния и временем нагружения при трехосном длительно статическом нагружении имеет вид:

$$s(t, t_0) = R_{gr, long} = -a \ln(t) + R_{gr, u}, \tag{1}$$

где  $a$  – значения полученные опытным путем.

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

$$e_{pl}(t_1, t_0) = c_{\%}(t_1, t) \times s(t_1, t_0) \times f(t_1, t_0), \tag{2}$$

где  $f(t_1, t_0) = 1 - e^{-\gamma(t-t_0)}$  – функция роста деформации ползучести;

$\gamma$  – параметр ползучести грунта;

$$c_{\%}(t_1, t) = \frac{e_{pl}(t_1, t)}{R_{gr, u}(t_1, t)} - \text{предельная мера ползучести грунта в момент времени } t.$$

При рассмотрении диаграмм состояния глинистого грунта при трехосном циклическом нагружении в качестве исходных использованы диаграммы деформирования « $\sigma_1 - \epsilon_1$ » для случая трехосного кратковременного статического нагружения. Трансформируя исходную диаграмму состояния при трехосном кратковременном статическом нагружении, получают аналитические зависимости для описания диаграмм деформирования глинистого грунта при трехосном кратковременном циклическом нагружении. По форме **трансформированные диаграммы** принимаются подобными исходной диаграмме состояния исходя из следующих положений (рис. 4 б):

- предельной точкой вертикального давления, в вершине диаграммы принимается напряжение в грунте, которая равняется пределу выносливости при трехосном циклическом нагружении  $R_{gr, long}(t, \tau)$  и деформации, отвечающие деформациям в вершине диаграммы состояния при трехосном циклическом нагружении  $\epsilon_{gr, red} = \epsilon_{gr, u}$ ;

- для предельной точки, определяющей границы диаграмм состояния по оси ординат, деформации равняются предельным деформациям при трехосном

кратковременном циклическом нагружении  $\varepsilon_{gr,red} = \varepsilon_{gr,R}$ , а по основным зависимостям (3) вычисляются напряжения в грунте;

- начала координат диаграмм принимаются смещенными на величину, которые равняются деформациям виброползучести в рассматриваемый цикл нагружения:  $\varepsilon_{pl}(N)$  – при кратковременном циклическом нагружении;

- полученные углы наклона диаграмм деформирования принимается с учетом изменения модуля деформации глинистого грунта при трехосном кратковременном циклическом нагружении.

Зависимость между предельной точкой вертикального давления в вершине диаграммы состояния и количеством циклов нагружения при циклическом нагружении имеет вид:

$$s(t_1) = R_{gr,long}(N) = R_{gr,u} \times e^{-\beta N}, \tag{3}$$

где  $\beta$  – значения полученные опытным путем;

$N$  – количество циклических нагружений.

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

$$e_{pl}(N) = c_{\varphi}(t_1) \times s^{\max}(t_1) \times f(N), \tag{4}$$

где  $f(N) = 1 - e^{-\gamma(N - N_0)}$  – функция роста деформации ползучести;

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

$c_{\varphi}(t_1) = \frac{e_{pl}(t_1)}{R(t_1)}$  – предельная мера ползучести грунта;



Рис. 5. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования грунта при режимном чередующемся статическом и циклическом нагружении

Аналитические зависимости для описания диаграмм деформирования грунта при режимном трехосном нагружении получаются путем трансформирования зависимостей (1-4) для трехосного длительного статического и циклического нагружения (рис. 5). При описании режимных деформирования грунта в условиях трехосного нагружения необходимо учитывать влияние вертикального давления ( $\sigma_1$ ) предыдущего блока на прочность, модуль деформации и относительные деформации в вершине диаграммы при последующем нагружении после смены режима. В пределах каждого блока, на которые развивается режимное нагружение, изменение диаграмм деформирования описывается по тем же формулам, что и при циклическом или длительно – статическом нагружении, но соответствующими для каждого блока  $\sigma_{1i}$ ,  $N_i$ ,  $T_i$ , или и с учетом изменение прочности и деформативности в предыдущих блоках.

При этом необходимо учитывать два характерных случая, когда:

- сначала действует длительное статическое  $\sigma_1(t)$  нагружение, а затем циклическое нагружение;

- сначала действует циклическая нагрузка  $\sigma_1(N)$ , а затем длительное статическое нагружение.

В первом случае общая долговечность увеличивается по сравнению с той, когда ведется циклическое нагружение со значением напряжения  $\sigma_1(N)$ . Это связано с

увеличением эффективной поверхности энергии разрушения грунта на первой ступени нагружения вследствие восстановления и увеличения коагуляционных связей [6].

Во втором случае снижение прочности при переходе на блок с длительной статической нагрузкой будет чрезвычайно медленным. Это объясняется «эффектом задержки» усталостных трещин в плоскостях предельного равновесия в расчетном объеме грунта [6].

Таким образом, при трансформировании исходной диаграммы для случая режимных нагружений необходимо учитывать влияние чередования длительно статических и циклических нагрузок.

В пределах начального блока, независимо от последовательности блоков нагружения, трансформированные диаграммы получаются аналогично не режимному длительно-статическому и циклическому нагружению. В каждом последующем блоке происходит дальнейшее трансформирование диаграммы деформирования, но исходной диаграммой для каждого из них является трансформированная диаграмма в конце предыдущего блока. Координаты вершины трансформированных диаграмм в начале каждого последующего блока зависят от уровня напряжений в предшествующих блоках и последовательности чередования блоков с разными видами нагружения.

На основании полученных трансформированных аналитических диаграмм деформирования разработан инженерный метод расчета осадок оснований, в основу которого положен метод послойного суммирования с учетом изменения пространственного напряженно-деформированного состояния грунтов в процессе трехосного длительно-статического, циклического и режимного статико-циклического нагружения.

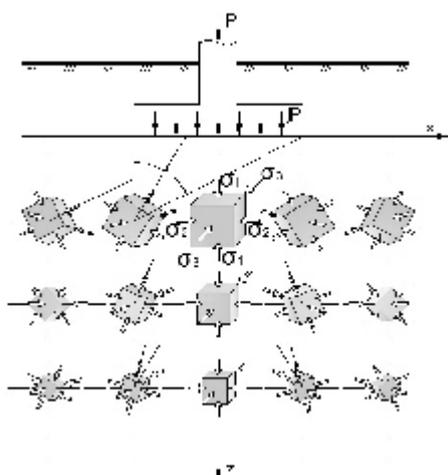


Рис. 6. Схема напряженного состояния основания фундамента при режимном нагружении

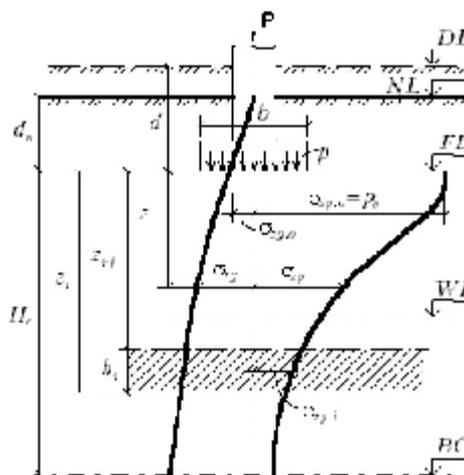


Рис. 7. Расчетная схема к определению осадки основания фундамента при режимном нагружении

Принимается объемное напряженное состояние грунта основания фундамента представленная на рис. 6. Разбивая сжимаемую толщу основание на слои  $h_i$ , для каждого слоя исходя из (рис. 6) для девиатора напряжений ( $\sigma_1$ ) определяем деформации  $\epsilon_{z,i}$ , соответствующие значению вертикального давления, а затем значения деформации в пределах сжимаемой толщи суммируется.

Таким образом, осадка основания вычисляются по формулам:

- при трехосном длительно статическом нагружении:

$$S = \sum_{i=1}^n \epsilon_{z,i}(t, t_0) h_i,$$

где  $n$  – количество слоев, на которые разбивается сжимаемая толща основания;

$h_i$  – толщина  $i$ -го слоя;

$\epsilon_{z,i}(t, \tau)$  – приращение осевой деформации  $i$ -го слоя при действии статической нагрузки  $t$ ;

$t$  – время соответствующая моменту наблюдения;

$t_0$  – время приложения нагрузки.

- при трехосном циклическом нагружении:

$$S = \sum_{i=1}^n \epsilon_{z,i}(N) \dot{u}_i,$$

где  $\epsilon_{z,i}(N)$  – приращение осевой деформации  $i$ -го слоя при действии циклической нагрузки;

- при трехосном режимном длительно статическом и циклическом нагружении:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \epsilon_{z,i}^m(N) + \sum_{j=1}^k \epsilon_{z,i}(t,t) \dot{u}_i,$$

где  $m$  – количество блоков циклического нагружения;

$k$  – количество блоков длительного статического нагружения.

График сопоставления результатов расчетных и экспериментальных исследований осадок модели плитного фундамента (с размерами 0,4x0,4 м) на глинистом грунтовом основании в лабораторном лотке (лоток с размерами 1x1x1 м), характеристики грунтов которые указаны выше, для условий трехосного нагружения, показаны на рис. 8. Как видно из рис. 8, наблюдается хорошая сходимость между расчетными и опытными данными осадок.

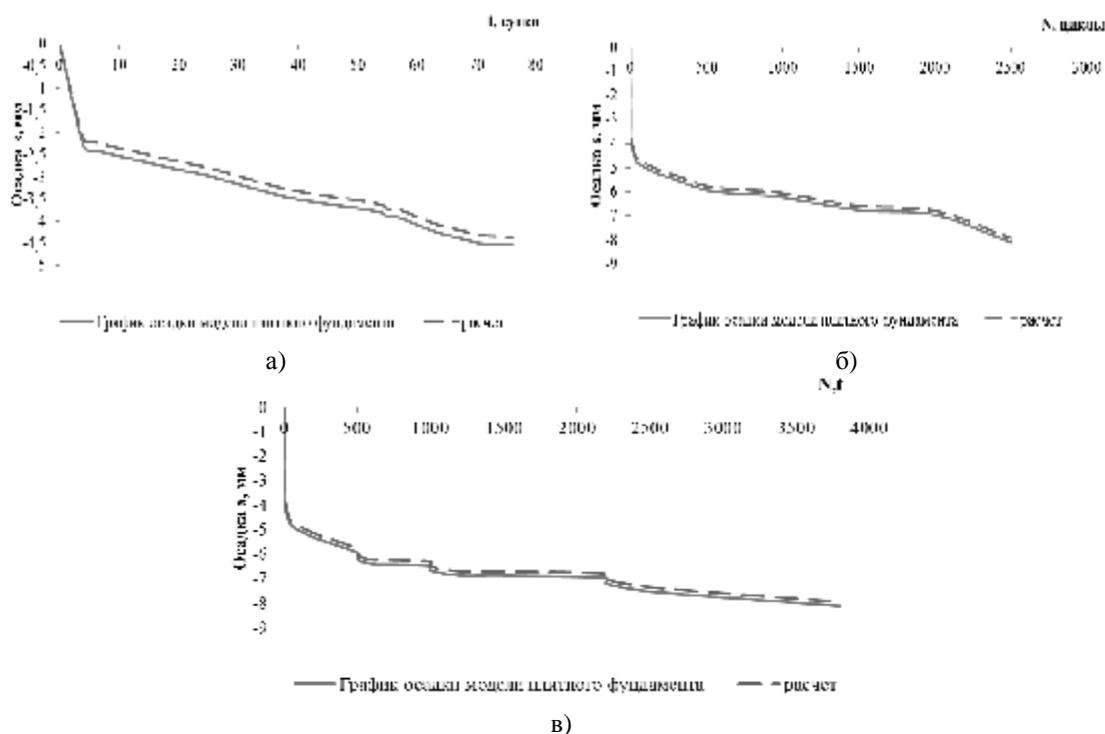


Рис. 8. График сопоставления осадок плитного фундамента:  
а) при длительном статическом нагружении; б) при циклическом нагружении;  
в) при режимном статико-циклическом нагружении

### 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: Сборник трудов Международ. научн. конф. (Москва, 19-21 октября 2011 г.); в 2 т., Т.2. – М.: МГСУ, 2011. – С. 342-347.
2. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Исследование прочности и деформативности глинистых грунтов при длительном трехосном сжатии // Известия КазГАСУ, 2009, № 2 (12). – С. 167-172.

3. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Особенности деформирования глинистых грунтов при циклическом трехосном сжатии // Международный журнал Геотехника, 2010, № 6. – С. 64-67.
4. 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.
5. 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, 8-11 октября 2014. – С. 130-135.
6. 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.
7. Вознесенский Е.А. Поведение грунтов при динамических нагрузках. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 286 с.
8. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов. – Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 1989. – 607 с.

**Mirsayapov I.T.** – doctor of technical sciences, professor

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

**Koroleva I.V.** – candidate of technical sciences

E-mail: [prepod-irina@ya.ru](mailto:prepod-irina@ya.ru)

**Sabirzyanov D.D.** – post-graduate student

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

### **Estimated rainfall pattern at the base of the foundations of the regime static-cyclic loading**

#### **Resume**

In the real world of construction and operation the load on the foundation soil is applied in stages as the construction of buildings and structures. Wherein the phases of the active loading at the construction stage transformed into phases of sequential alternation of long static and cyclic loading, if there is an equipment that creates a dynamic impact on the foundation soil installed in the building or construction.

However, existing methods of calculation are not able to take into account the particular strain of foundations under such loadings.

The article presents the results of experimental and theoretical studies of the clay foundation soils under triaxial long-static, cyclic and static and modal cyclic loading. Describes the source and transformed the clay soil deformation diagram for long-static, cyclic and static and modal prolonged cyclic loading. The test results are presented and processed in the form of graphs and used for comparison with theoretical studies. Based on the analysis of the transformed strain diagrams developed engineering method for calculating sediment grounds, based on the method of layering summation taking into account spatial changes of stress-strain state of the soil in the process of regime static and cyclic loading. At the end of the article compares the results of triaxial tests with a trough at long-static, cyclic and static and modal prolonged cyclic deformation of the clay base slab foundation.

**Keywords:** clay soils, triaxial, static loading, cyclic loading, modal-static cyclic loading, calculation model, sediment, transformed diagram analytical dependences, strength, stress.

#### **Reference list**

1. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Bearing capacity of foundations and rainfall with prolonged loading // Integration, partnership and innovation in building science and

- education: International Collection of papers. Scien. Conf. (Moscow, 19-21 October 2011), 2 t. V. 2. – M.: MGRS, 2011. – P. 342-347.
2. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Research strength and deformability of clay soils with prolonged triaxial compression // *Izvestiya KGASU*, 2009, № 2 (12). – P. 167-172.
  3. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Features deformation of clayey soils under cyclic triaxial compression // *International Journal Geotechnics*, 2010, № 6. – P. 64-67.
  4. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V., Sabirzyanov D.D. Strength and deformation of clayey soils under triaxial modal alternating static and cyclic loading // *Geotechnics of Belarus: Science and Practice*, 2013. – P. 297-304.
  5. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V., Sabirzyanov D.D. Warp clay soils combined with the regime and the long-term cyclic loading // *Perspective directions of development of the theory and practice of rheology and soil mechanics. Proceedings of the XIV International Symposium on rheology*, October 8-11, 2014. – P. 130-135.
  6. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. The strength and deformability of clay soils under the regime spatial stress state in view of cracking // *Grounds, foundations and soil mechanics*, 2016, № 1. – P. 16-23.
  7. Voznesensky E.A. *The behavior of soils under dynamic loads*. – M.: Izd. MGU, 1997. – 286 p.
  8. Zaretsky J.K. *Lectures on modern soil mechanics*. – Rostov-na-Donu: Izdatelstvo Rostov University Press, 1989. – 607 p.