

УДК 624.131.54

**Хасанов Р.Р.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: rubis.hasanov@yandex.ru

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

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

### **Экспериментальные исследования деформаций и физико-механических характеристик водонасыщенных глинистых грунтов при циклических нагружениях в объемном лотке**

#### **Аннотация**

В статье приведены результаты экспериментальных исследований деформативности водонасыщенных глинистых грунтов при циклических нагружениях, проведенных в объемном лотке в лаборатории грунтоведения кафедры оснований, фундаментов динамики сооружений и инженерной геологии. Выполнен анализ результатов исследований, и установлены некоторые закономерности поведения глинистых грунтов при циклических нагружениях.

**Ключевые слова:** грунт, циклическое нагружение, объемный загрузочный лоток, деформация грунта, физико-механические характеристики.

В отечественной и зарубежной практике строительства известно много случаев потери устойчивости оснований сложенных водонасыщенными глинистыми грунтами от действия циклической нагрузки, приводящие к разрушениям отдельных конструкций или же зданий и сооружений в целом.

В целях экспериментального изучения деформативности вышеупомянутых грунтов при воздействии на них циклических нагрузок и установления некоторых закономерностей в лаборатории грунтоведения кафедры оснований, фундаментов динамики сооружений и инженерной геологии была проведена серия испытаний водонасыщенных глинистых грунтов в объемном лотке.

Целью проведения экспериментальных исследований являлось изучение поведения водонасыщенных глинистых грунтов и изменения их физико-механических характеристик под влиянием циклической нагрузки, приложенной на массив грунта через круглый штамп.

При проведении экспериментальных исследований было проведено 5 серий испытаний. В каждой серии грунты подвергались испытанию циклической нагрузкой в 400-500 циклов. Каждый цикл состоял из процесса многократного нагружения и разгрузки грунта кратковременной статической нагрузкой.

В качестве испытуемого образца грунта был принят суглинок нарушенной структуры со следующими физическими характеристиками:  $\rho = 1,89 \text{ г/см}^3$ ;  $\rho_s = 2,71 \text{ г/см}^3$ ;  $W_L = 36 \%$ ;  $W_p = 21 \%$ ;  $W = 31 \%$ ;  $I_p = 15 \%$ ;  $I_L = 0,67$ ;  $e = 0,88$ ;  $S_r = 0,95$ . Образцы грунтов изготавливались в соответствии с приложением «В» ГОСТ 30416-96 «Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения». Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 12248-96 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости».

Эксперименты проводились в испытательном лотке с внутренними размерами 40×40×40 см (объемом 64 литра). Внутренние стенки лотка были покрыты полиэтиленовой пленкой для исключения контакта испытываемого грунта с внутренней поверхностью стенок лотка и возможного впитывания поровой воды. Стенки лотка были сделаны жесткими для исключения деформаций бокового расширения.

Грунт после увлажнения в течение 24 часов был равномерно уложен в испытательный лоток слоями толщиной по 2-3 см с уплотнением трамбовкой до заданной плотности. Через каждые  $\approx 8$  см грунта устраивалась подсыпка из мелкого песка толщиной 1-2 мм для установления картины послойного деформирования грунта по глубине по завершении испытания (всего 5 слоев). После укладки грунт выдерживался в лотке в течение суток для более равномерного увлажнения.

Нагрузка на поверхность грунта передавалась через жесткий металлический штамп диаметром 16 см посредством загрузочного устройства, представляющего собой рычажный пресс секторного типа с пятикратным увеличением прикладываемой на рычаги нагрузку. Под штампом была предусмотрена подсыпка из мелкозернистого песка.

Для измерения абсолютных деформаций грунта и штампа применялись индикаторы часового типа ИЧ-10 МН и прогибомер с ценой деления 0,01 мм. Индикаторы были установлены в гнезда индикаторной рамы в два ряда по обе стороны от штампа и фиксировали деформации грунта на расстоянии 2 и 7 см от его границ. Прогибомер фиксировал осадку штампа посредством стальной нити, закрепленной на его поверхности. Показания индикаторов снимались как при нагружениях, так и при разгрузках штампа. Схема расположения измерительных приборов показана на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Загрузочное устройство

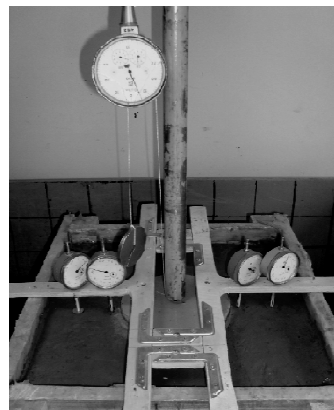


Рис. 2. Расположение рамы с индикаторами и прогибомера

Испытания проводились в следующей последовательности:

1. Статическое нагружение грунта ступенями по 15 кПа до достижения максимального давления в грунте под штампом  $\sigma_{\max} = 120$  кПа с фиксацией показаний индикаторов и прогибомера в конце каждой ступени после стабилизации осадок штампа. Время условной стабилизации деформаций осадки штампа принималось равным 60 мин.

2. Выдержка грунта под статической нагрузкой  $\sigma_{\max} = 120$  кПа до условной стабилизации осадки штампа в течение 24 часов. На время выдержки испытательный лоток с грунтом был прикрыт сверху полиэтиленовой пленкой для предотвращения изменения влажности в верхних слоях грунта за счет испарения влаги.

3. Циклическое нагружение грунта при следующих параметрах: максимальное давление цикла  $\sigma_{\max} = 120$  кПа, коэффициент асимметрии цикла  $\rho_0 = 0,1$ , уровень нагружения  $\eta = 0,8$ , частота приложения нагрузки  $\omega = 0,067$  Гц.

Показания индикаторов и прогибомера в первые 50 циклов фиксировались после каждого цикла «нагрузка-разгрузка», а затем через каждые 10 циклов, по которым строились графики зависимостей абсолютных деформаций штампа от числа циклов нагружения  $S = f(N)$ , а также изменения плотности, влажности, коэффициента пористости и модуля деформации грунта по глубине до и после испытания (рис. 3).

Анализ результатов проведенных экспериментов (рис. 3) показал, что влажность верхних слоев грунта под штампом уменьшилась при испытаниях на  $4 \div 4,5$  %, нижних же, напротив, увеличилась на  $1 \div 1,5$  %. Влажность верхних участков грунта, расположенных на расстоянии до 5 см от границ штампа, по результатам всех проведенных экспериментов также уменьшилась в среднем на  $2 \div 2,5$  %, влажность нижних слоев увеличилась в среднем на  $2,5 \div 3$  %. Таким образом, миграция воды при испытаниях происходила, в основном, в нижние слои грунта, а также в стороны, что, определенно, связано с уменьшением водопроницаемости области грунта под штампом при уплотнении, т.е. свободная вода, выдавливаясь из пор, мигрировала в менее уплотненные и более водопроницаемые зоны грунта.

Согласно графику изменения плотности грунта (рис. 3), после испытания плотность верхних слоев грунта увеличилась в среднем на 8 % по сравнению с исходным значением. При этом практически во всех экспериментах плотность грунта, залегающего в середине по высоте испытательного лотка, была наименьшей, что можно объяснить разуплотнением, т.е. отрицательной дилатансией грунта в этой зоне (местоположение этой зоны совпадает с вершиной уплотненного ядра (конуса) под штампом).

Модуль деформаций  $E$  после испытания во всех слоях, кроме 2-го слоя сверху, увеличивается в среднем в 2 раза; во 2-м же слое наблюдается увеличение модуля деформаций в среднем в 3,5 раза.



Рис. 3. Обобщенные графики изменения основных физико-механических характеристик грунта

На рис. 4 представлена картина послойного деформирования грунта при испытаниях, проанализировав которую можно заметить, что после испытания толщина слоя грунта, находящегося непосредственно под контуром штампа стала намного меньше исходной. Причем толщина верхнего слоя грунта вдоль центральной оси штампа после нагружений уменьшилась незначительно, что нельзя сказать о следующем слое, где толщина слоя после испытаний уменьшилась почти вдвое, несмотря на то, что вертикальные напряжения сжатия в нем меньше, чем в вышележащем слое грунта.

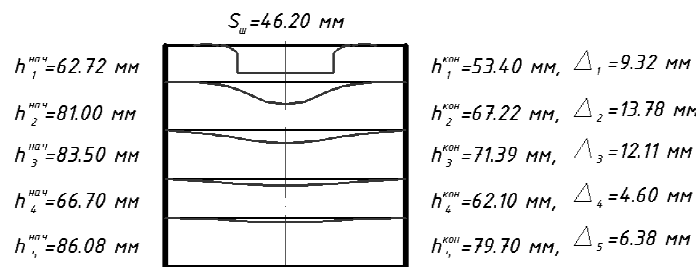


Рис. 4. Картина послойного деформирования грунта для эксперимента № 2 (исходная и деформированная схемы по слоям)

Такое поведение грунта под штампом можно объяснить следующим образом. Как известно, согласно решения, так называемой, «контактной задачи» механики грунтов, при приложении нагрузки на грунт через жесткий штамп под его краями в грунте возникают максимальные (в теории – бесконечные) напряжения, которые практически с

самого начала нагружения приводят к развитию областей предельного состояния (т.е. пластического деформирования) грунта в этих зонах. Деформирование грунта на начальных этапах нагружения сопровождается, в основном, уплотнением, а в дальнейшем – его выдавливанием в разные стороны: наружу – за пределы подошвы штампа, и, возможно, частично вовнутрь – в область под штампом, формируя тем самым уплотненное ядро в виде конуса или пирамиды.

На рис. 5 представлен график развития абсолютных деформаций осадки штампа при циклическом нагружении  $\varepsilon = f(N)$  для одного из испытаний (на графике циклы «нагрузка-разгрузка» для наглядности показаны условно). Проанализировав этот построенный по показаниям индикаторов график, можно установить, что на начальном этапе циклического нагружения грунта деформации осадки штампа носили лишь упругий характер. Пластические деформации начинали проявляться только после приложения 10-15 циклов «нагрузка-разгрузка» (рис. 5).

Одна из причин такого поведения грунтов заключается в следующем. В начале испытания при ступенчатом статическом нагружении грунта (как отмечалось, давление постепенно довели до значений максимальных напряжений цикла нагружения  $\sigma_{max}$ ) частицы грунта сближались между собой, что приводило к их перекомпоновке и выдавливанию воды через поры грунта, что, в свою очередь, способствовало разрушению водно-коллоидных связей. За время выдержки грунта в течение суток под статическим давлением происходило частичное восстановление водно-коллоидных связей между частицами. В силу этого в начале циклического нагружения вся внешняя энергия сжатия затрачивалась на разрушение вновь сформировавшихся водно-коллоидных связей, и грунт проявлял, в основном, лишь упругие свойства. После определенного количества циклов нагружения (в зависимости от длительности предварительной выдержки и вида глинистого грунта) эти связи начинали разрушаться, и грунт начинал деформироваться упругопластически.

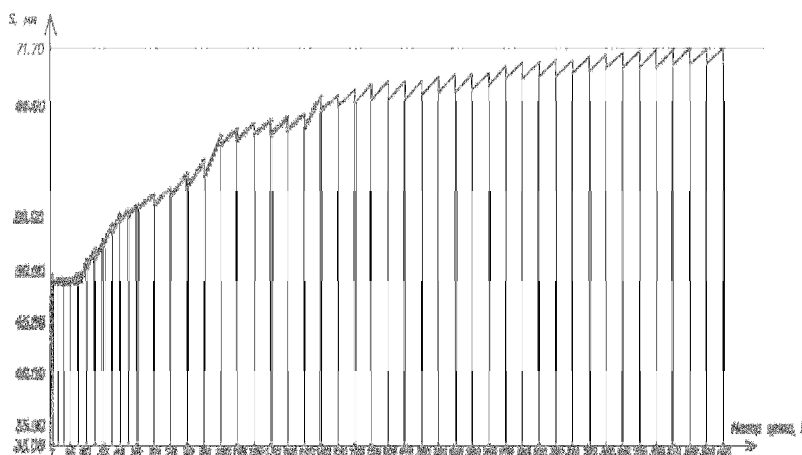


Рис. 5. График изменения абсолютных деформаций штампа при циклическом приложении нагрузки в эксперименте № 2

Упругому деформированию грунта на начальном этапе нагружения способствовала также и высокая степень водонасыщения грунта. Согласно теории фильтрационной консолидации деформирование грунта возможно только при отжатии воды из пор. При первых циклах нагружения напряжения сжатия воспринимались только поровой водой, деформации грунта при этом не развивались. С постепенной передачей части нагрузки на скелет грунта, т.е. увеличением эффективного давления, возрастали и деформации сжатия.

По представленному графику (рис. 5) также можно сделать вывод, что при выдержке грунта в процессе предварительного статического, а затем последующего циклического нагружения деформации носят «затухающий» характер, т.е. на обоих этапах нагружения имеет место процесс затухающей ползучести.

При испытаниях развитие пластических деформаций грунта затухало в среднем ближе к 400-му циклу «нагрузка-разгрузка», при этом максимальные абсолютные

значения (амплитуда) упругих деформаций грунта внутри каждого цикла нагружения не превышали 2 мм.

На рис. 6 представлен обобщенный для всех экспериментов график зависимости относительных деформаций от числа циклов нагружения  $N$  в логарифмических координатах  $\varepsilon = f(\lg N)$ .

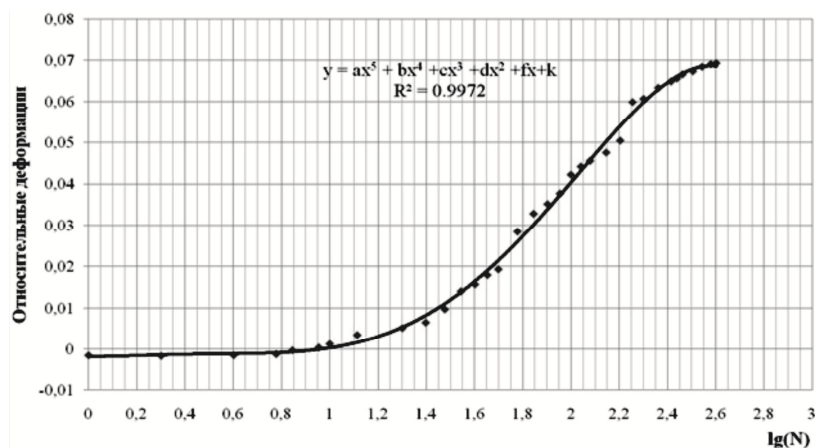


Рис. 6. Обобщенный для всех экспериментов график зависимости  $\varepsilon = f(\lg N)$

На графике можно выделить 3 характерные зоны: I – зона упругого деформирования грунта (с 0 по 10 цикл); II – зона интенсивного развития пластических деформаций при циклическом нагружении (с 10 по 350 цикл); III – зона затухания деформаций (выше 350 цикла). Таким образом, при принятых характеристиках испытуемого грунта и параметрах циклического нагружения получена картина затухающей ползучести грунтов.

Таким образом, на основании анализа результатов, полученных при проведении экспериментальных исследований деформаций водонасыщенных глинистых грунтов при циклических нагружениях в объемном лотке, можно сделать следующие основные выводы:

1. При циклическом нагружении изменение физико-механических характеристик грунта под штампом по глубине носит четко выраженный зонированный характер. Характеристики грунтов до и после испытания в зоне уплотненного ядра под штампом, под «острием» уплотненного конуса, за пределами границ штампа и т.д. изменяются по разным закономерностям (рис. 3).

2. В процессе циклического нагружения грунта происходит увеличение деформаций осадки по сравнению с первым циклом нагружения до 1,5 раз (рис. 5).

3. Затухание деформаций водонасыщенных глинистых грунтов при статическом нагружении происходит за более короткий промежуток времени, чем при циклических нагружениях, т.к. консолидация грунтов при циклических испытаниях за счет непродолжительного действия нагрузки в каждом цикле достигается гораздо дольше (рис. 5).

4. Пластическое деформирование грунта при циклическом нагружении начинается только после приложения определенного количества (в рамках данной работы порядка 10-15) циклов нагружения, приводящих к разрушению водно-коллоидных связей, сформировавшихся между частицами за время предварительной выдержки грунта под статической нагрузкой, а также отжатию части поровой воды (рис. 5).

### Список библиографических ссылок

1. Дедов В.Л. Экспериментальные исследования зависимости деформируемости грунтов от плотности и предварительного уплотнения при повторных нагрузках // Труды ТГТУ. – Тамбов: 2004, Вып. 16. – С. 35-37.
2. Дедов В.Л. Расчёт значения модуля упругости связных грунтов под воздействием повторных вертикальных нагрузок // Труды ТГТУ. – Тамбов: 2006, Вып. 19. – С. 77-79.

3. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях: Пер. с англ. / Под ред. А.Б. Фадеева, М.Б. Лисюка / НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект». – СПб.: 2006. – 384 с.
4. Хасанов Р.Р., Гиниятуллин Р.Р. Экспериментальные исследования деформативности водонасыщенных глинистых грунтов при циклических нагрузениях // Известия КГАСУ, 2008, № 2 (10). – С. 85-89.
5. Сафин Д.Р. Исследование деформативности водонасыщенных глинистых грунтов, армированных вертикальными армирующими элементами // Известия КГАСУ, 2008, № 2 (10). – С. 81-84.
6. Мирсяпов И.Т., Королева И.В. Особенности деформирования глинистых грунтов при режимном нагружении // Известия КГАСУ, 2012, № 4 (22). – С. 193-198.
7. Raybould M. University of Nottingham cyclic triaxial test facility. In: «Earthquake, Blast and Impact Measurement and Effects of Vibration». SECED, Elsevier. – N.-Y., 1991. – P. 295-306.
8. Viggiani. G. Dynamic measurements of small strain stiffness of fine grained soils in the triaxial apparatus. Experimental Characterization and Modeling of Soils and Soft Rocks, Proceedings of the Workshop in Napoli, 1991. – P. 75-97.

**Khasanov R.R.** – candidate of the technical sciences, associate professor

E-mail: rubis.hasanov@yandex.ru

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

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

### **Experimental studies of deformation and physical-mechanical features of water-saturated clay soils under cyclic loading in bulk tray**

#### **Resume**

The article presents the results of experimental studies of deformation of water-saturated clay soils under cyclic loading carried in bulk tray in the laboratory of the Department of Soil bases, foundations, structural dynamics and engineering geology.

When conducting experimental studies were conducted 5 test series. In each series of soils were tested cyclic loads of 400-500 cycles.

As a test sample of soil was taken clay loam broken structure. Experiments were conducted in a test tray to the internal dimensions of 40×40×40 cm. The load on the ground surface transmitted through the rigid metal punch with a diameter of 16 cm.

Performed an analysis the results of research, and set some of the behavior of clay soils under cyclic loading.

Analysis of experimental results showed that cyclic loading has leads to an increase in the density and deformation modulus of soil, deformation under cyclic loading was damped character.

In tests, the development of plastic deformation of soil attenuated in average closer to the 400-th cycle «loading-unloading», while in the process of cyclic loading of soil there was an increase of settlement deformations compared to the first cycle of loading up to 1,5 times.

**Keywords:** soil, cyclic loads, bulk tray, soil deformation, physical-mechanical features.

#### **Reference list**

1. Dedov V.L. The experimental studies to dependencies deformation of the soil from density and preliminary compaction under the repeated load/ Works of the TGTU. – Tambov, 2004, Issue 16. – P. 35-37.
2. Dedov V.L. Calculation of importance of the module to bounce liason soil under influence of the repeated vertical loads / Works of the TGTU. – Tambov, 2006, Issue 19. – P. 77-79.

3. Ishikhara K. Behavior of soil at earthquakes / Under editing of A.B. Fadeev, M.B. Lisyuk / NPO «Geoconstructsiya-Fundamentproject». – SPb., 2006. – 384 p.
4. Khasanov R.R., Ghiniatullin R.R. Experimental studies of deformation of water-saturated clayey soils under cyclic loads // News of the KSUAE, № 2 (10). – P. 85-89.
5. Safin D.R. Vertically reinforced water-saturated clay soil body deformability studies // Izvestiya KGASU, 2008, № 2 (10). – P. 81-84.
6. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Features of deformation of clay soils during regime loading // News of the KSUAE, 2012, № 4 (22). – P. 193-198.
7. Raybould M. University of Nottingham cyclic triaxial test facility. In: «Earthquake, Blast and Impact Measurement and Effects of Vibration». SECED, Elsevier. – N.-Y., 1991. – P. 295-306.
8. Viggiani. G. Dynamic measurements of small strain stiffness of fine grained soils in the triaxial apparatus. Experimental Characterization and Modeling of Soils and Soft Rocks, Proceedings of the Workshop in Napoli, 1991. – P. 75-97.