



УДК 624.153.6

**Мирсаяпов Илизар Талгатович**

доктор технических наук, профессор

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

**Королева Ирина Владимировна**

кандидат технических наук, доцент

E-mail: [79178711218@yandex.ru](mailto:79178711218@yandex.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

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

**Исследования влияния миграции воды  
на изменения физико-механических характеристик глинистого грунта  
в условиях трехосного нагружения**

**Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследований глинистого грунта нарушенной структуры – выявить особенности миграции воды в пределах образца на различных этапах режимного нагружения. Существующие данные об экспериментальных исследованиях в данном направлении носят разрозненный характер.

*Результаты.* Основными результатами выполненных исследований являются новые данные об изменении влажности в характерных зонах образца в процессе режимного трехосного нагружения, а также влияние установленного изменения на механические характеристики грунта. Выполнен анализ результатов исследований и установлены некоторые закономерности.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в установлении влияния миграции воды в пределах образца на изменение прочностных параметров глинистого грунта в условиях трехосного сжатия, что позволяет достоверно моделировать поведение грунта в основании фундамента.

**Ключевые слова:** глинистый грунт, влажность грунта, трехосное сжатие, угол внутреннего трения, удельное сцепление, миграция воды.

**Введение**

Современные запросы строительной отрасли возрастают в связи с активным освоением подземного пространства, заглубляясь до 100 м ниже дневной поверхности земли. Особенности поведения грунтов оснований фундаментов глубокого заложения, которые являются неотъемлемой частью подземных сооружений и высотных зданий, рассмотрены в работах российских и зарубежных исследователей [1-9]. Вышеназванные исследования показывают, что проблемы, возникающие при устройстве таких фундаментов и их оснований, связаны с неадекватным прогнозированием поведения грунтов. Это ставит перед геотехникой вообще и механикой грунтов в частности новые задачи, для решения которых требуются новые или усовершенствованные модели грунтов [9, 10]. При этом доля ответственности за выданные для проектирования результаты инженерно-геологических исследований и определенные значения физико-механических характеристик грунтов оснований существенно возрастает. Вопросы изменения механических характеристик грунтов во времени в процессе приложения нагрузки входят на первый план. В работе авторов [10] рассматривался вопрос о наличии в образце грунта после испытаний зон различной плотности и непостоянстве значений угла внутреннего трения и удельного сцепления грунта во времени, также авторами было оценено влияние режима нагружения на деформации образцов и разработана расчетная модель дилатирующего грунта. Некоторые особенности определения характеристик грунтов для современных расчетных моделей в лабораторных условиях описаны в работе [8].

Однако вопрос миграции влаги и изменения плотности в образце в процессе испытания изучен недостаточно. В связи с вышеизложенным, на кафедре Оснований, фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии Казанского государственного архитектурно-строительного университета были проведены

экспериментальные исследования по изучению изменения физико-механических характеристик глинистых грунтов в условиях трехосного сжатия.

### Экспериментальные исследования

Для испытаний использовались приборы трехосного сжатия кубической формы и стабилометрического типа. Образцы для первого прибора изготавливались в виде куба с размерами граней  $100 \times 100$  мм, образцы цилиндрической формы имели размеры  $38 \times 76$  мм (рис. 1а).

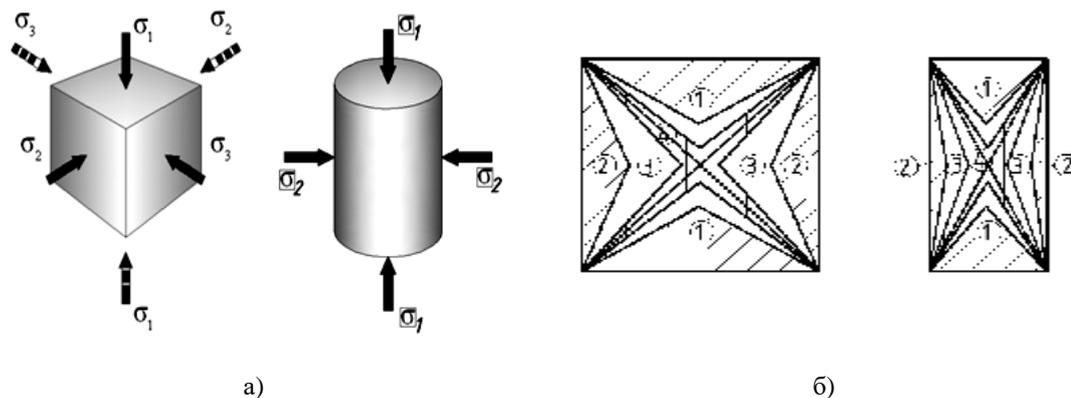


Рис. 1. Схемы: а) Схема нагружения образца: кубической формы (слева) и цилиндрического (справа); б) Схема расположения локальных зон различной плотности в образце кубической формы (слева) и цилиндрического (справа) при трехосных испытаниях:  
1 – вертикальные уплотненные пирамиды; 2 – уплотненные пирамиды у боковых граней;  
3 – зона однородного напряженного состояния; 4 – зона дилатансии (иллюстрация авторов)

Испытывались глинистые грунты нарушенной структуры, приготовленные из пасты, чтобы исключить влияние инородных включений в виде крупных заполнителей и крупных пор, и грунты природного сложения.

Было проведено 4 серии испытаний. Образцы первой и второй серии выдерживались 30 минут под всесторонним давлением, а затем, с кратковременной выдержкой, которая составляла не более 10 минут, производилось девиаторное нагружение. Третья и четвертая серии экспериментов проводились по аналогичным схемам загрузки, однако изменялось время выдержки, как на этапе всестороннего обжатия, так и на этапах приложения девиаторной нагрузки. В первой и третьей сериях экспериментов образцы были доведены до разрушения при девиаторном нагружении по схеме «раздавливания», а испытания второй и четвертой серий были остановлены на этапе приложения ступеней девиаторного нагружения с целью изучения изменения характеристик грунта в образце в процессе приложения нагрузки.

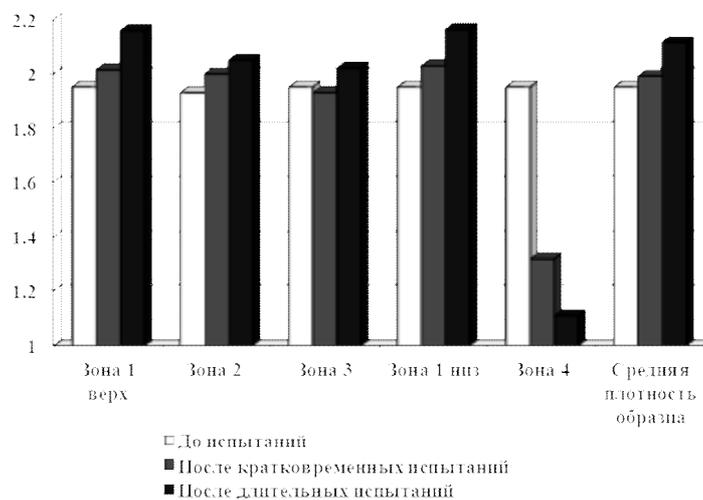
После завершения испытаний из характерных зон образцов (рис. 1б) отбирались пробы грунта и определялись их плотность, влажность, удельное сцепление и угол внутреннего трения.

На рис. 2а представлены данные об изменении плотности грунта в характерных зонах, полученные после «раздавливания» образцов при кратковременном (серия 1) и длительном (серия 3) нагружениях.

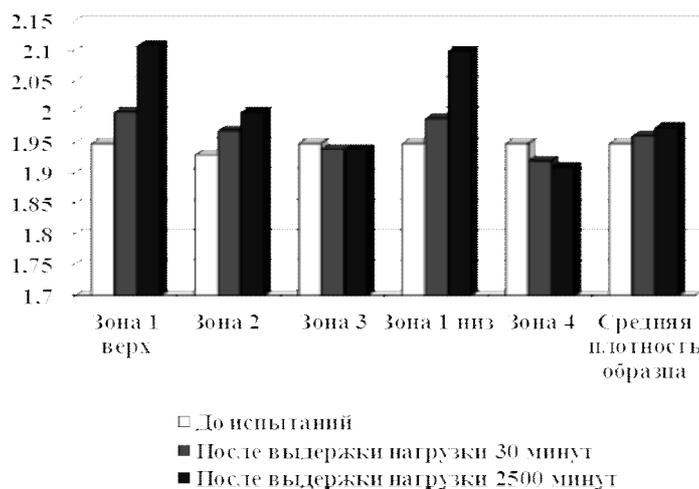
Результаты распределения плотности и влажности в образцах грунта, имеющих разное время приложения всестороннего обжатия и не доведенных до разрушения вертикальной статической нагрузкой (серии 2 и 4), приведены на рис. 2б.

В результате экспериментальных исследований плотности и влажности грунта образцов установлено, что после разрушения образца первой серии испытаний в зоне 1 произошло уплотнение грунта на 5 % относительно значения исходной плотности при максимально возможном увеличении плотности в указанной зоне на 12 % в условиях длительного нагружения (серия 3) (рис. 2а), при этом на этапе всестороннего обжатия за 30 минут грунт в вертикальных пирамидах доуплотнился на 2,5 %, а в серии 4

зафиксировано доуплотнение до 8 % (рис. 2б). Полученные результаты показывают, что на первых этапах нагружения происходит доуплотнение грунта с образованием разных по плотности зон, при этом пророст плотности существенно зависит от скорости приложения нагрузки. Этот факт подтверждает теорию о механизме деформирования и разрушения образца, предложенную авторами [10].



а)



б)

Рис. 2. Данные по изменению плотности в характерных зонах образца: а) после разрушения; б) на первой ступени девиаторного нагружения (иллюстрация авторов)

Влажность грунта также не является постоянной величиной (рис. 3). На этапе всестороннего обжатия при кратковременной выдержке (серия 2) влажность в уплотненной зоне 1 уменьшилась на 0,86 % от начального значения, а в зоне 4 увеличилась на 1,1 %, после разрушения образца кратковременной статической нагрузкой (серия 1) влажность в зоне 1 составила 96,2 %, а в зоне 4 – 98 % от исходного значения. Увеличение длительности всестороннего обжатия (серия 4) привело к изменению влажности в вертикальной уплотненной зоне на 1,77 %, а в зоне разуплотнения – на 2,6 %. Полученные результаты показывают, что уменьшение скорости нагружения способствует перемещению большего объема воды в зону разуплотнения.

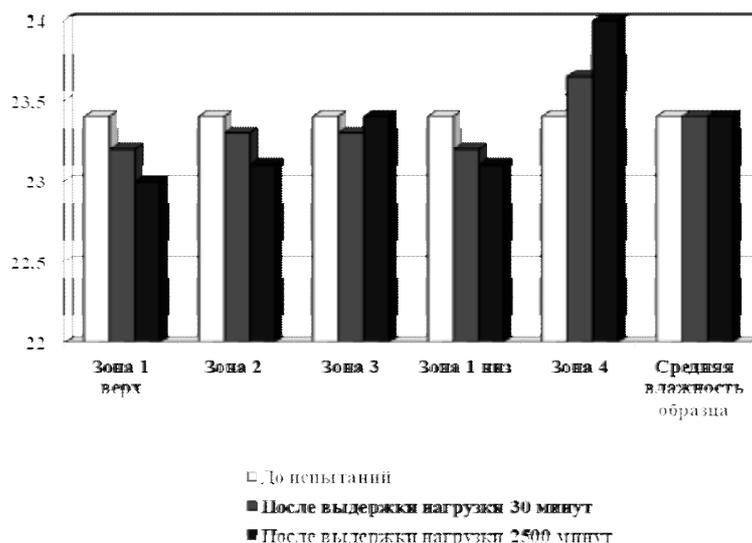
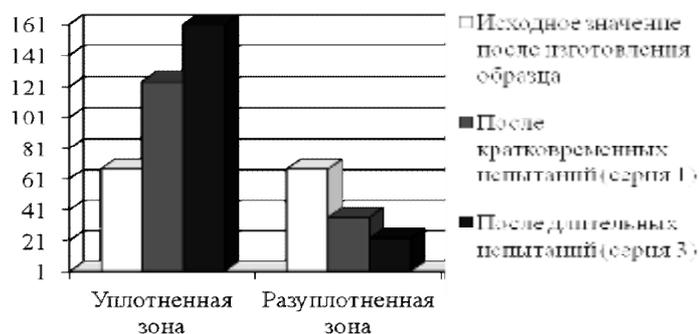
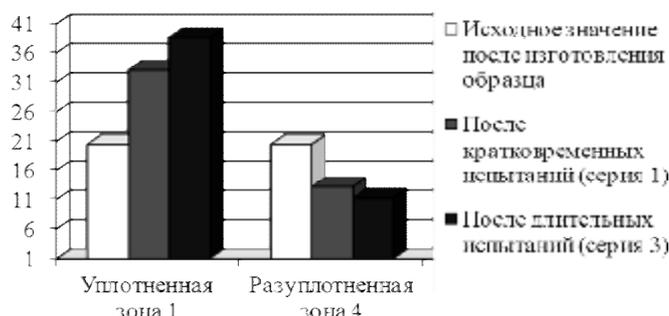


Рис. 3. Данные по изменению влажности (%) в характерных зонах образца на первой ступени девиаторного нагружения (иллюстрация авторов)

Из характерных зон образцов 1 и 4, разрушенных девиаторным нагружением, были отобраны пробы грунта и определены прочностные характеристики: угол внутреннего трения –  $\varphi$  и удельное сцепление –  $c$ . В уплотненной зоне зафиксировано увеличение механических характеристик по сравнению с начальными значениями  $\varphi$  и  $c$  на 88 % и 138 % соответственно, а в локальной зоне 4 зафиксировано снижение  $\varphi$  до 45 % и  $c$  до 67 % (рис. 4).



а)



б)

Рис. 4. Данные по изменению параметров прочности грунта в характерных зонах образца:  
 а) Данные по изменению угла внутреннего трения –  $\varphi$  в характерных зонах образца;  
 б) Данные по изменению удельного сцепления –  $c$  в характерных зонах образца  
 (иллюстрация авторов)

Анализ полученных данных позволил установить, что, независимо от режима нагружения образца (длительного или кратковременного) и типа испытательного оборудования, в образце формируется сложное напряженное состояние, которое способствует образованию зон различной плотности и влажности. Размеры указанных зон, плотность и влажность грунта в их пределах не являются постоянной величиной и изменяются в течение нагружения.

### **Теоретические исследования**

В процессе нагружения в образце грунта одновременно происходит два взаимосвязанных процесса: формирование и развитие зон различной плотности и миграция влаги между этими зонами.

Рассмотрим каждый из выше названных процессов в отдельности.

Формирование уплотненных зон начинается на этапе всестороннего обжатия и их первоначальные размеры и плотность зависят от величины средних нормальных напряжений и длительности этапа приложения нагрузки (рис. 2б). Увеличение размеров уплотненных зон зависит от угла наклона площадки предельного равновесия, в плоскости которой начинается образование микротрещин, в зависимости от преобладающего процесса: либо объединение микротрещин в макротрещину и формирование площадки сдвига и, как следствие, разрушение грунта, либо залечивание путем восстановления коллоидных связей и схлопывание микротрещин и, как результат, упрочнение грунта в рассматриваемой плоскости и поворот площадки предельного равновесия при дальнейшем нагружении, рост уплотненной зоны и дальнейшее ее движение как жесткого тела внутри образца [10].

Миграция влаги из зоны уплотнения в зону разупрочнения с уменьшающейся, вследствие образования микротрещин, плотностью (зона дилатансии) происходит в процессе всего нагружения. При этом в зоне дилатансии (зона 4 рис. 1б), являющейся зоной, в которой образуются микротрещины и, соответственно, плотность грунта образца является минимальной (рис. 2а). Происходит выдавливание влаги из зон уплотнения, плотность грунта в разуплотненной зоне при длительных испытаниях составляет 67,7 % от начального значения, а влажность увеличивается на 3 %. Указанная свободная вода в микротрещинах включается в процессы самозалечивания грунта, то есть образования коллоидных связей между частицами. Таким образом микротрещина заполняется коллоидным раствором, концентрация напряжений в вершине трещины уменьшается и процесс разрушения затухает до тех пор, пока новый этап нагружения образца не вызывает увеличения напряжений в данной точке. Следует отметить, что одновременно эта вода выступает в качестве смазки между частицами грунта на поверхности скольжения, уменьшает силу трения и удельное сцепление между ними и способствует сдвигу одной части грунта в образце относительно другой.

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что длительность этапа нагружения существенно влияет на объем перемещаемой жидкости.

При кратковременных испытаниях не вся свободная вода вытесняется из пор и скорость перемещения воды меньше чем при длительных испытаниях, то есть влага не успевает в полном объеме переместиться в зону 4 (рис. 1б), поврежденную микротрещинами. В этом случае, процессы разрушения преобладают над процессами самозалечивания ввиду нехватки влаги для восстановления коллоидных связей, кроме того часть влаги, переместившаяся в зону 4, выступает в качестве скользящей прослойки между частицами грунта и ускоряет сдвиговые процессы. Этот факт подтверждается существенным снижением удельного сцепления и угла внутреннего трения в зоне дилатансии в образце.

### **Заключение**

Установлено, что независимо от режима нагружения образца и типа испытательного оборудования в образце формируется сложное напряженное состояние, которое способствует образованию зон различной плотности и влажности. Размеры этих зон, плотность и влажность грунта, его механические характеристики в пределах указанных зон не являются постоянной величиной и изменяются в течение нагружения.

**Список библиографических ссылок**

1. Ильичев В. А., Мангушев Р. А. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М. : АСВ, 2014. 728 с.
2. Петрухин В. П. Геотехнические проблемы строительства в Москве – крупнейшем мегаполисе России : сб. тр. международной конференции – Геотехнические проблемы мегаполисов / ГК «Геореконструкция». Москва, 2010. Том 1. С. 259–320.
3. Katzenbach R. Soil-structure-interaction of Tunnels and Superstructures During Construction and Service Time // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 57. P. 35–44.
4. Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З., Соболев Е. С. Ползучесть и виброползучесть грунтов : сб. тр. XIV международного симпозиума по реологии грунтов – Перспективные направления развития теории и практики в реологии и механике грунтов / КГАСУ. Казань, 2014. С. 8–23.
5. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Experimental and theoretical studies of bearing capacity and deformation of reinforced soil foundations under cyclic loading : Proc. intern. symp., Kyoto, Japan – Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics / Balkema. Lieden, 2014. P. 742–747.
6. Tanaka T., Yoshiyuki Mohri, Zhussupbekov A. Zh. Elasto-plastic and Viscoplastic Finite Element Analysis – Direct Shear Box Test and Dynamic Deformation of Reinforced Embankment Dam : сб. тр. XIII международного симпозиума по реологии грунтов – Достижения, проблемы и перспективные направления развития для теории и практики механики грунтов и фундаментостроения / КГАСУ. Казань, 2012. С. 18–26.
7. Шакиров И. Ф., Гайфуллина В. А. Исследование влияния добавок на инъекционные свойства цементных растворов, применяемых при укреплении грунтов напорной цементацией : сб. ст. XXI международной научно-практической конференции – Технические науки – от теории к практике / Научный журнал «Globus». Санкт-Петербург, 2017. С. 37–41.
8. Тер-Мартirosян А. З., Мирный А. Ю., Соболев Е. С. Особенности определения параметров современных моделей грунта в ходе лабораторных испытаний // *Геотехника*. 2016. № 1. С. 66–72.
9. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases : Proc. intern. symp., Seoul, Korea – Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground / Balkema. Lieden, 2014. P. 401–404.
10. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Strength and deformability of clay soil under different triaxial load regimes that consider crack formation // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2016. Vol. 53. Iss. 1. P. 5–11.

**Mirsayapov Iizar Talgatovich**

doctor of technical sciences, professor

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

**Koroleva Irina Vladimirovna**

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [79178711218@yandex.ru](mailto:79178711218@yandex.ru)

**Kazan State University of Architecture and Civil Engineering**

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

**Studies of the water migration effect on changes  
in the clay soil physico-mechanical characteristics under triaxial loading conditions****Abstract**

*Problem statement.* The purpose of the study of clay soil of a damaged structure is to identify the features of water migration within the sample at various stages of regime loading. Existing data on experimental studies in this direction are scattered.

*Results.* The main results of the studies performed are new data on the change in humidity in the characteristic areas of the sample during the regime of triaxial loading, as well as the effect of the established change on the mechanical characteristics of the soil. The analysis of the research results is carried out and some regularities are established.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry consists in determining the effect of water migration within the sample on the change in the strength parameters of clayey soil under three-axis compression conditions, which makes it possible to reliably model the behavior of the soil in the base of the foundation.

**Keywords:** clay soil, soil moisture, triaxial compression, angle of internal friction, specific adhesion, water migration.

## References

1. Ilyichev V. A., Mangushev R. A. Directory geotechnics. Bases, foundations and underground structures. M. : ASV, 2014. 728 p.
2. Petrukhin V. P. Geotechnical problems of construction in Moscow – the largest metropolis of Russia : proceedings of the International Conference – Geotechnical problems of megacities / GC «Georeconstruction». Moscow, 2010. Vol. 1. P. 259–320.
3. Katzenbach R. Soil-structure-interaction of Tunnels and Superstructures During Construction and Service Time // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. P. 35–44.
4. Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z., Sobolev Ye. S. Creep and vibrocreep of soils : proceedings of the XIV International Symposium on Soil Rheology – Promising directions for the development of theory and practice in rheology and soil mechanics / KGASU. Kazan, 2014. P. 8–23.
5. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Experimental and theoretical studies of bearing capacity and deformation of reinforced soil foundations under cyclic loading : Proceedings international symposium, Kyoto, Japan – Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics / Balkema. Lieden, 2014. P. 742–747.
6. Tanaka T., Yoshiyuki Mohri, Zhussupbekov A. Zh. Elasto-plastic and Viscoplastic Finite Element Analysis – Direct Shear Box Test and Dynamic Deformation of Reinforced Embankment Dam : proceedings of the XIII international symposium on Soil Rheology – Achievements, Problems and Perspective Directions of Development for the Theory and Practice of Soil Mechanics and Foundation Engineering Problems / KGASU. Kazan, 2012. P. 18–26.
7. Shakirov I. F., Gayfullina V. A. Researches of the effect from additives on the cement mortars injection properties used in strengthening soil pressure cementation : dig of art. of the XXI International Scientific and Practical Conference – Technical Sciences – from theory to practice / Nauchnyy zhurnal «Globus». St. Petersburg, 2017. P. 37–41.
8. Ter-Martirosyan Z. G., Mirnyj A. Yu., Sobolev Ye. S. Features of determining the parameters of modern soil models during laboratory tests // Geotechnika. 2016. № 1. P. 66–72.
9. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases : Proc. intern. symp., Seoul, Korea – Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground / Balkema. Lieden, 2014. P. 401–404.
10. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Strength and deformability of clay soil under different triaxial load regimes that consider crack formation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016. Vol. 53. Iss. 1. P. 5–11.