



УДК 624.153.6

Мирсайпов И.Т. – доктор технических наук, профессор

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Королева И.В. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: 79178711218@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Особенности деформирования глинистых грунтов при повышающемся режимном нагружении

Аннотация

Постановка задачи. Основной целью выполненных исследований является изучение особенностей деформирования глинистого грунта нарушенной структуры в условиях режимного циклического нагружения при повышающемся уровне вертикальной нагрузки с учетом высоких уровней боковых напряжений. На сегодняшний день отсутствуют данные о результатах исследований при указанном режиме нагружения.

Результаты. В качестве основных результатов исследований можно отметить получение новых данных об особенности развития относительной вертикальной деформации в зависимости разных значений девиаторных напряжений цикла в исследуемых образцах при высоких уровнях боковых напряжений. На основании выполненного анализа результатов исследований установлены некоторые закономерности поведения образцов глинистых грунтов при режимных циклических и длительно-статических трехосных нагружениях.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в исследовании особенностей деформирования образцов глинистого грунта нарушенной структуры при перемене режима нагружения при высоких уровнях боковых напряжений, а также в установлении влияния вертикальной нагрузки цикла на напряженно-деформированное состояние глинистого грунта и скорость его деформирования. Установлено, что предшествующее нагружение существенно влияет на скорость развития вертикальных деформаций образца, то есть на деформационные характеристики глинистого грунта нарушенной структуры.

Ключевые слова: глинистый грунт, режимное нагружение, трехосное сжатие, структурное упрочнение, деформации.

Введение

Основания зданий и сооружений подвергаются воздействию статических и циклических нагружений. При этом в реальных условиях загрузки грунтов основания вышеперечисленные воздействия могут прикладываться в различной последовательности и могут иметь некоторую неодинаковую продолжительность [1-7]. Однако, на сегодняшний день, при расчете оснований зданий и сооружений по второй группе предельных состояний рассматривается только монотонное постоянно действующее нагружение. Механические характеристики грунта определяются по результатам однократных статических нагружений, при этом лишь трехосные испытания учитывают влияние боковых нагрузок прочность и деформации образца. Изменение характеристик грунтового основания в процессе приложения внешних режимных нагрузок не учитывается.

Существующие экспериментальные и теоретические исследования показывают, что механические параметры глинистых грунтов в условиях реального нагружения не являются постоянными величинами и их значения существенно зависят от режима приложения нагрузки [1-10].

Наибольший интерес вследствие недостаточной изученности представляет собой режимное циклическое нагружение с высокими значениями боковых давлений $\sigma_2 = \sigma_3$ при поэтапном повышении вертикальной нагрузки σ_1 . В связи с вышеизложенным, на кафедре в приборе истинного трехосного сжатия были проведены экспериментальные исследования и изучено деформирование глинистого грунта при указанном режиме нагружения.

Экспериментальные исследования

Исследование процесса деформирования в условиях режимного циклического нагружения выполнено на образцах глинистого грунта нарушенной структуры с заданными параметрами плотности-влажности, изготовленного по методике, разработанной на кафедре Оснований, фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии. Испытания проводились в приборе трехосного сжатия в условиях комбинированного режимного нагружения при высоком уровне боковых напряжений. Программой запланировано две серии экспериментов по режимам, представленным на рис. 1. В обеих сериях экспериментов было предусмотрено всестороннее нагружение $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, которое прикладывалось в три этапа по 80 кПа. В первом случае (рис. 1а) девиаторное нагружение составило 90 кПа, после чего грунт подвергся блоку статического нагружения в течение 60 минут. Во втором эксперименте (рис. 1б) к образцу приложено статическое девиаторное нагружение 60 кПа, которое длилось 60 мин. Затем к обоим образцам был приложен блок циклической нагрузки с амплитудой цикла $\Delta\sigma_{1(1)}$, которая составила 0,09 МПа и 0,06 МПа соответственно. Следующим этапом нагружения был блок длительной статической нагрузки, который продлился 1 сутки. Указанный блок сменился блоком режимного циклического нагружения, когда к образцу сначала приложена циклическая нагрузка с амплитудой цикла $\Delta\sigma_{1(1)} = \Delta\sigma_{1(2/1)}$, а затем амплитуда цикла была увеличена до $\Delta\sigma_{1(2/2)}$. На смену вышеназванному блоку пришел блок длительного статического нагружения, а затем циклического нагружения (рис. 1), который привел к разрушению образца (циклическая нагрузка прикладывалась до достижения образцом предельных деформаций).

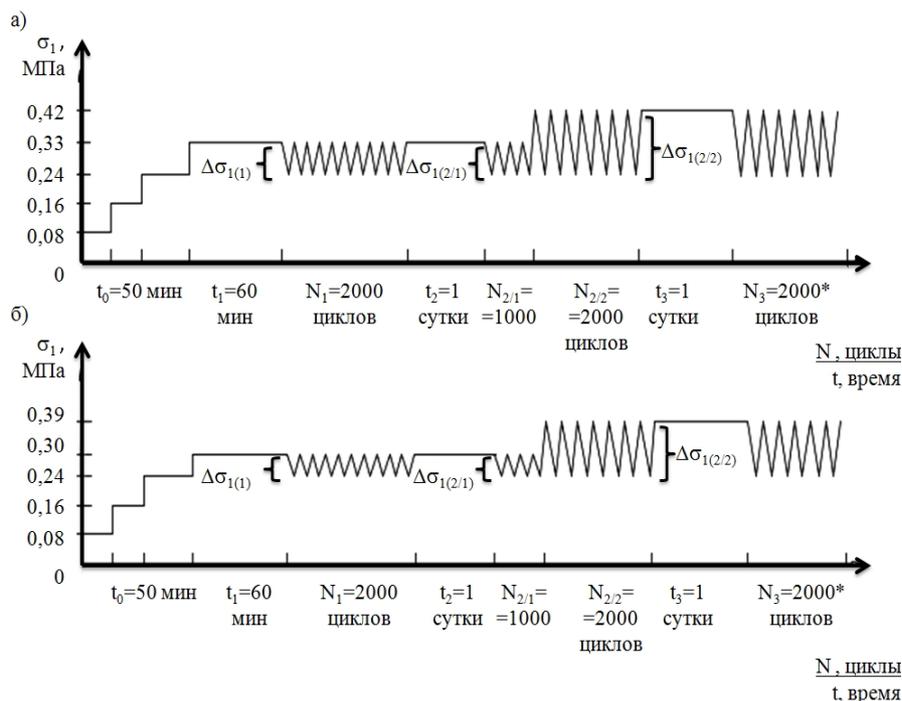


Рис. 1. Режим повышающегося блочного нагружения: а) Серия № 1; б) Серия № 2

В ходе экспериментальных исследований вертикальные и горизонтальные деформации образцов грунта фиксировались по индикаторам часового типа, особое внимание уделялось начальному этапу загрузки, росту деформаций за первые тысячу циклов каждого блока циклического нагружения, а также временным интервалам, соответствующим смене режима с циклического на длительно-статический. По результатам экспериментальных исследований построены графики развития относительных вертикальных деформаций на различных блоках нагружения, при этом величина накопленной деформации на предыдущих блоках нагружения принималась равной нулю.

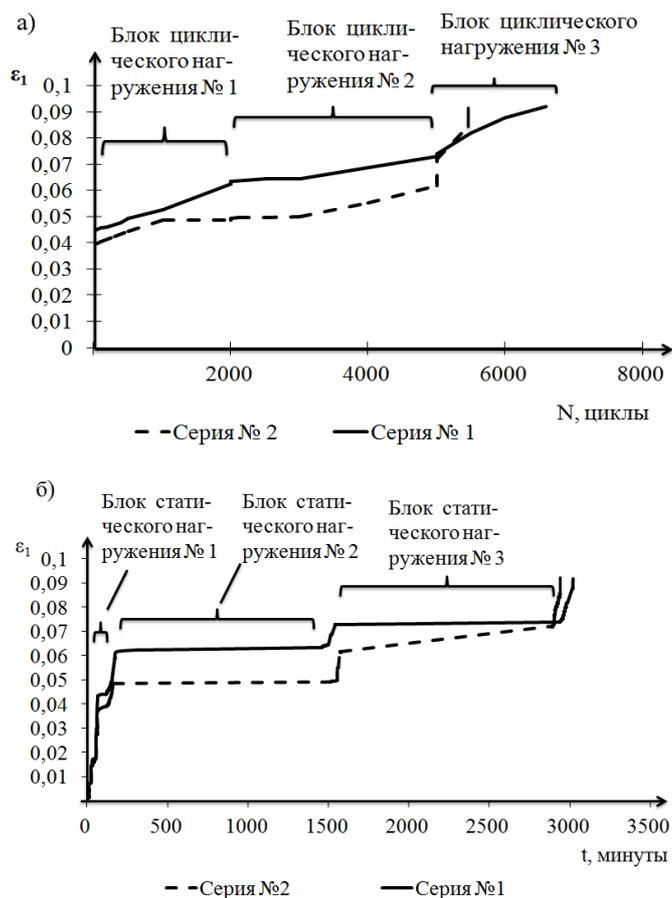


Рис. 2. График развития относительных вертикальных деформаций в условиях повышающегося блочного нагружения: а) от количества циклов нагружения; б) во времени

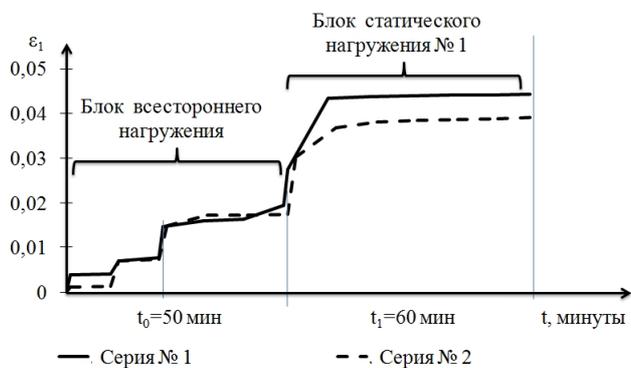


Рис. 3. График развития относительных вертикальных деформаций в условиях повышающегося блочного нагружения: а) от количества циклов нагружения; б) во времени

Установлено, что деформации с различной скоростью развиваются в течение всего эксперимента (рис. 2). Как видно из графиков, при высоких уровнях боковых напряжений на блоках циклического нагружения деформации растут интенсивнее, чем в условиях длительного статического загрузения. Так доля вертикальных деформаций на всех этапах приложения циклической нагрузки составила около 50 % от величины максимальных деформаций, зафиксированных при разрушении образца, а на блоках № 2 и № 3 статического нагружения – суммарная деформация менее 12 %.

Наибольшее развитие деформаций наблюдается на этапе активного статического нагружения с последующей 60-ти минутной выдержкой под статической нагрузкой

(рис. 3). Прирост вертикальных деформаций при $\sigma_{1(1)} = 0,33$ МПа в певой серии составил 44 %, а во второй серии при $\sigma_{1(1)} = 0,3$ МПа – 39 % от предельных значений, зафиксированных в момент разрушения образца. В этот момент происходит доуплотнение глинистого грунта нарушенной структуры, объем образца уменьшается на 10 % за счет уменьшения объема пор и пустот. Происходит формирование уплотненного ядра у каждой грани образца и возникновение локальных зон предельного равновесия (рис. 4), размеры которых не являются постоянными и увеличиваются в зависимости от вида загрузки [8]. При этом на этапе выдержки образца под статической нагрузкой скорость деформаций постепенно уменьшалась, а прирост деформаций составил до 10 %. Данный факт свидетельствует об изменении напряженно-деформированного состояния внутри образца глинистого грунта нарушенной структуры во времени и затухании деформаций ползучести вследствие недостаточности размеров уплотненных зон и значительной ширины грунтовой среды между ними.

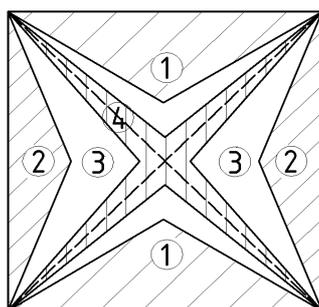


Рис. 4. Схема расположения локальных зон различной плотности в образце при трехосных испытаниях: 1 – вертикальные уплотненные пирамиды, 2 – уплотненные пирамиды у боковых граней, 3 – разуплотненная зона, 4 – зона предельного равновесия

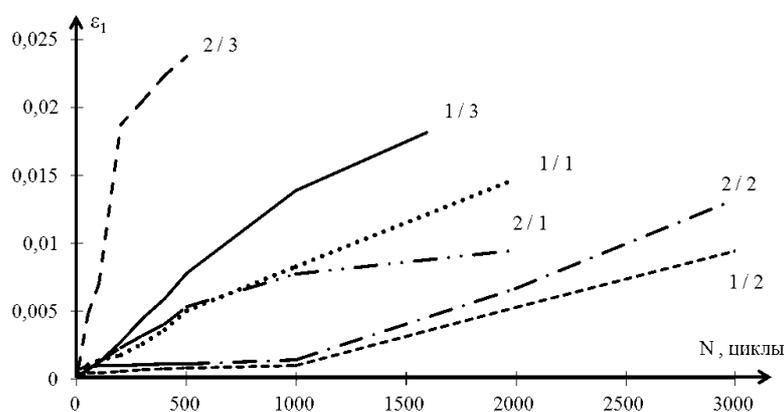


Рис. 5. График развития относительных вертикальных деформаций в пределах блока циклического нагружения:
1/1, 1/2, 1/3 – Серия № 1 блоки № 1, № 2 и № 3 соответственно;
2/1, 2/2, 2/3 – Серия № 2 блоки № 1, № 2 и № 3 соответственно

На этапе приложения циклического нагружения происходит постепенное накопление вертикальных и объемных деформаций. Как показано на рис. 5, в первый день приложения циклической нагрузки деформации увеличиваются при $\Delta\sigma_{1(1)} = 0,09$ МПа на 18 %, а при $\Delta\sigma_{1(1)} = 0,06$ МПа – на 10 %. Следует отметить, что наибольшая скорость деформирования образцов зафиксирована в течение первых пятистах циклах нагружения, а после приложения тысячного цикла деформации замедляются, а при низком значении $\Delta\sigma_{1(1)}$ затухают. Это объясняется двумя взаимно компенсирующими явлениями, происходящими в зоне между уплотненными пирамидами

внутри образца глинистого грунта: упрочнением, обусловленным залечиванием дефектов и более плотной перекомпоновкой частиц, и разупрочнением, вызванным переориентацией частиц и образованием микротрещин [10], которые при высоких значениях амплитуды цикла «схлопываются», а при низких значениях остаются неизменными. На данном этапе деформирования уплотненные пирамиды увеличиваются в объеме, а степень поврежденности микротрещинами грунта в зоне, расположенной между указанными пирамидами, существенно мала.

На этапе длительной статической нагрузки (блоки № 2 и № 3) наблюдается незначительный прирост вертикальных деформаций, но он начинается с некоторой задержкой во времени после начала данного этапа загрузки, что связано, так как в образце имеется напряжение, созданное в процессе предшествующего циклического нагружения. Учитывая, что вертикальные напряжения $\sigma_{1(1)}$ имеют маленькие значения и не могут вызвать активизацию процесса длительной ползучести (не могут вызвать дальнейшее образование повреждений микротрещинами в зоне между уплотненными пирамидами), преобладающими на этом этапе загрузки являются процессы восстановления коагуляционных связей и происходит залечивания микротрещин, то есть упрочнение грунта [11].

На втором блоке циклического нагружения деформации выросли, в среднем, на 11 %. В процессе приложения первой тысячи циклов с амплитудой $\Delta\sigma_{1(1)} = \Delta\sigma_{1(2)}$ деформации увеличились не более чем на 1 %, при этом в условиях аналогичного (с равными параметрами цикла) нагружения в первом блоке циклической нагрузки прирост деформаций был в 10 раз больше. Указанный факт позволяет заключить, что в интегральном объеме образца деформационные характеристики глинистого грунта нарушенной структуры увеличились по сравнению со значениями, которые были у него в начале первого блока циклической нагрузки. Это увеличение модуля деформации является результатом процессов восстановления связей и микроструктурного упрочнения глинистого грунта, которые происходили в образце на предыдущем этапе длительного статического нагружения.

Вышеизложенное свидетельствует, что учет истории предшествующего нагружения в рамках данных режимов позволит получать более экономичные проектные решения. Следует отметить, что в локальной зоне между уплотненными пирамидами в образце глинистого грунта происходит накопление дефектов и степень повреждения микротрещинами увеличивается, начинается процесс роста длины трещины [10, 11].

На третьем блоке длительной нагрузки во второй серии экспериментов ($\sigma_{1(1)} = 0,3$ МПа) наблюдается больший прирост деформаций, чем в первой серии ($\sigma_{1(2)} = 0,33$ МПа), и, как следствие, суммарные деформации образцов выравниваются, что свидетельствует о предельном потенциале уплотнения грунта в интегральном объеме образца. Данная особенность деформирования проявляется при комбинации режимов нагружения в условиях малых значений вертикального девиатора и больших значений боковых давлений.

На третий день в течение блока циклического нагружения вертикальные деформации образца достигли предельных значений, их прирост составил около 30 % (рис. 5). Деформирование образца происходило за счет перемещения уплотненных пирамид как жестких тел, в это же время в зоне между пирамидами началось преобладание процессов разупрочнения грунта над упрочнением, возникла прогрессирующая ползучесть и, как следствие, стадия разрушения. Следует отметить, указанные процессы разупрочнения, сопровождающиеся образованием микро и макротрещин, охватывают не весь объем грунта, а лишь зоны предельного равновесия (рис. 4).

Заключение

В результате анализа данных экспериментальных исследований установлено:

1. Развитие деформаций глинистого грунта нарушенной структуры в условиях трехосного сжатия при больших уровнях боковых давлений зависит от режима нагружения, уровня средних нормальных напряжений в образце и истории предшествующего нагружения.

2. Процессы микроструктурного упрочнения грунта при малых значениях девиатора на этапах длительного статического нагружения улучшают деформационные характеристики глин в интегральном объеме образца.

3. В течение процесса режимного нагружения происходит формирование уплотненного ядра у каждой грани образца и возникновение локальных зон предельного равновесия, размеры которых не являются постоянными и увеличиваются в зависимости от вида нагружения.

4. На этапе разрушения в зонах предельного равновесия процессы разупрочнения, сопровождающиеся образованием микро и макротрещин, преобладают над процессами упрочнения, что подтверждается развитием деформаций прогрессирующей ползучести.

Список библиографических ссылок

1. Ильичев В. А., Мангушев Р. А. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М. : АСВ, 2014. 728 с.
2. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Прогнозирование деформаций оснований фундаментов с учетом длительного нелинейного деформирования грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2011. № 4. С. 16–23.
3. Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З., Соболев Е. С. Ползучесть и виброползучесть грунтов : сб. трудов XIV междунар. симп. по реологии грунтов – Перспективные направления развития теории и практики в реологии и механике грунтов / КГАСУ. Казань, 2014. С. 8–23.
4. 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.
5. 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. трудов XIII междунар. симп. по реологии грунтов – Достижения, проблемы и перспективные направления развития для теории и практики механики грунтов и фундаментостроения / КГАСУ. Казань, 2012. С. 18–26.
6. 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.
7. Шакиров И. Ф., Гарифуллин Д. Р. Исследование массива грунта, укрепленного напорной цементацией : сб. ст. VIII междунар. научно-практич. конференции – Актуальные вопросы науки, технологии и производства / СПбГАСУ. СПб., 2015. С. 80–83.
8. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Расчетная модель длительного нелинейного деформирования глинистых грунтов при сложном напряженном состоянии // Известия КГАСУ. 2011. № 2 (16). С. 121–128.
9. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Особенности деформирования глинистых грунтов при режимном нагружении // Известия КГАСУ. 2012. № 4 (22). С. 193–198.
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.
11. 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.

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

E-mail: mirsayapov@kgasu.ru

Koroleva I.V. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: 79178711218@yandex.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Features of clay soils deformation with increasing regime loading

Abstract

Problem statement. The main goal of the performed studies is to study the features of deformation of clay soil of the disturbed structure under regime cyclic loading with an increasing level of vertical load taking into account high levels of lateral stresses. To date, there are no data on the results of studies under this loading regime.

Results. As the main results of the research, one can note the receipt of new data on the peculiarities of the development of relative vertical deformation in dependence of different values of deviator stresses of the cycle in the samples under high levels of lateral stresses. On the basis of the performed analysis of the results of investigations, certain regularities in the behavior of clay soil samples were established under regime cyclic and long-term static triaxial loads.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry is to study the features of the deformation of clay soil samples of the damaged structure under the change in the loading regime at high lateral stress levels, as well as in determining the influence of the vertical load of the cycle on the stress-strain state of clay soil and its deformation rate. It is established that the previous loading significantly affects the rate of development of vertical deformations of the sample, that is, the deformation characteristics of the clayey soil of the disturbed structure.

Keywords: clay soil, regime loading, triaxial compression, structural hardening, deformations.

References

1. Ilyichev V. A., Mangushev R. A. Directory geotechnics. Bases, foundations and underground structures. M. : ASV, 2014. 728 p.
2. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Prediction of deformation of the foundation with the long-term non-linear deformation of soil // *Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov*. 2011. № 4. P. 16–23.
3. Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z., Sobolev Ye. S. Creep and vibrocreep of soils : Proc. XIV intern. symp. on the rheology of soils – Future directions of the theory and practice of rheology and soil mechanics / KGASU. Kazan, 2014. P. 8–23.
4. 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.
5. 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 : Proc. XIII intern. symp. on the rheology of soils – 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.
6. 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.
7. Shakirov I. F., Garifullin D. R. Investigation of the soil massif strengthened by pressure carburizing : Collection of articles VIII international. scientific and practical. conference – Actual issues of science, technology and production / SPbGASU. SPb., 2015. P. 80–83.
8. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Designed model of long nonlinear deformation of clay soil in a complex stress state // *Izvestiya KGASU*. 2011. № 2 (16). P. 121–128.
9. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Features of deformation of clay soils during loading of regime // *Izvestiya KGASU*. 2012. № 4 (22). P. 193–198.
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. Volume 53. Issue 1. P. 5–11.
11. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Influence of the hardening process, the strength of clay soil under regime triaxial loading // *Izvestiya KGASU*. 2017. № 1 (39). P. 145–152.