

УДК: 624.131.43  
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.5  
EDN: EIBUAF



## Нелинейное деформирование глин при режимном трехосном нагружении

И. В. Королева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** *Постановка задачи.* Современные города растут не только ввысь, но и в глубину, поэтому в качестве основания рассматриваются более глубокие слои грунтовой толщи, изучение механических свойств которых только начинается. Следует отметить, что под подошвой фундаментов возникают значительные напряжения, что требует в процессе проектирования оценивать не только линейные, но и нелинейные деформации. Цель работы – анализ влияния содержания воды в грунте и величины среднего нормального напряжения на особенности нелинейного поведения при деформировании высокопластичных иллитовых глин нарушенной структуры в условиях трехосного осесимметричного (стабилометрического) нагружения. Основными задачами исследования являются: создание идентичных образцов-цилиндров из иллитовых глин нарушенной структуры с высоким содержанием глинистых частиц; разработка программы испытаний и проведение трехосных осесимметричных нагружений; определение по результатам анализа построенных графиков и полученных форм разрушения особенностей нелинейного деформирования образцов при разных значениях влажности и среднего нормального напряжения; математическое описание процесса объемного деформирования образца грунта нарушенной структуры, изготовленного из высокопластичной глины.

*Результаты.* Эксперименты в условиях осесимметричного трехосного нагружения проведены с использованием грунтовых образцов, изготовленных из высокопластичных иллитовых глин нарушенной структуры. Для анализа рассмотрены три значения содержания воды в грунтовых образцах 38%, 40% и 42%. Основными результатами анализа реализованных экспериментов являются новые данные о развитии линейных вертикальных и радиальных деформаций, модулей общих деформаций и модулей сдвига высокопластичных глин в условиях трехосного нагружения зависимости от разных значений влажности грунта и величины средних напряжений. Выполнен анализ результатов исследований и установлены некоторые закономерности поведения глинистых грунтов нарушенной структуры при трехосных статических нагружениях.

*Выводы.* Установление влияния содержания воды в грунте и величины средних нормальных напряжений на развитие вертикальных и объемных деформаций и на изменение деформационных параметров образца, созданного из высокопластичной иллитовой глины, в условиях трехосного стабилометрического нагружения является важной задачей для строительной отрасли.

**Ключевые слова:** трехосные испытания, глина высокопластичная, влажность, стабилометр, нелинейное деформирование.

**Для цитирования:** Королева И.В. Нелинейное деформирование глин при режимном трехосном нагружении // Известия КГАСУ, 2025, № 4 (74), с. 52-62, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.5, EDN: EIBUAF

# Nonlinear deformation of clays under regime triaxial loading

I.V. Koroleva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* Modern cities grow not only upward but also downward, so deeper soil layers are considered as basements, and the study of their mechanical properties is only just beginning. It should be noted that significant stresses arise under the foundation base, which requires that not only linear but also nonlinear deformations to be assessed during the design process. The objective of this study is to analyze the influence of soil water content and mean normal stress on the nonlinear behavior in case of deformation of highly plastic illite clays with a faulted structure under triaxial axisymmetric (stabilometric) loading. The primary objectives of the study, which led to the achievement of this objective, were: creating identical cylindrical specimens from illite clays with a faulted structure and a high clay particle content; developing a test program and conducting triaxial axisymmetric loading; determining nonlinear deformation characteristics of specimens at different moisture contents and mean normal stress values based on the analysis of the constructed graphs and the obtained failure modes; and providing a mathematical description of the volumetric deformation process of a soil specimen with a faulted structure made of highly plastic clay.

*Results:* Experiments under axisymmetric triaxial loading were conducted using soil samples made from highly plastic illite clays with a disturbed structure. Three water contents in the soil samples were considered for analysis: 38%, 40%, and 42%. The main results of the analysis of the conducted experiments are new data on the development of linear vertical and radial deformations, total deformation moduli, and shear moduli of highly plastic clays under triaxial loading, depending on different soil moisture contents and average stresses. The analysis of the research results was performed, and certain patterns in the behavior of clayey soils with a disturbed structure under triaxial static loading were established.

*Conclusions:* Establishing the influence of water content in soil and the value of average normal stresses on the development of vertical and volumetric deformations and on the change in deformation parameters of a sample made of highly plastic illite clay under triaxial stabilometric loading is an important task for the construction industry.

**Keywords:** triaxial tests, highly plastic clay, humidity, stabilometer, nonlinear deformation.

**For citation:** Koroleva I.V. Nonlinear deformation of clays under regime triaxial loading // News of KSUAE, 2025, № 4 (74), p. 52-62, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.5, EDN: EIBUAF

## 1. Введение

Основания зданий должны быть надежным массивом для восприятия нагрузок, при этом основным критерием надежности является чаще не несущая способность грунта, а величина его деформаций под воздействием внешних давлений, то есть главным является расчет по второй группе предельных состояний (СП 22.13330).

Ввиду различной истории происхождения и формирования грунты являются самым ненадежным, обладающим большим числом факторов риска элементом системы «основание – фундамент – надземное сооружение» [1–3]. Следует отметить, что вышележащая толща грунтового массива имеет достаточную изученность [4–6], поскольку такие грунты чаще применялись как основания фундаментов мелкого заложения и фундаментов из коротких свай [7–9]. Фундаменты глубокого заложения в современном строительстве опираются на грунты, которые ранее не использовались в качестве оснований и их физико-механические характеристики либо определены впервые, либо имеют небольшое количество определений [10, 11]. При этом установлено, что качество отбора образцов существенно влияет на значения прочностных и деформационных параметров грунта, определенных в лабораторных условиях [12].

Механические характеристики грунтов оснований не являются постоянной величиной, что описывается в работах [5, 13, 14]. Параметры грунта постоянно

изменяются под воздействием загрязнений химическими веществами, особенно нефтепродуктами [15–17], следует отметить, что вопрос активно изучается как на территории Российской Федерации, так и за ее пределами. В связи с устройством котлованов и подземных объемов рядом с существующими объектами, в основаниях последних были зафиксированы измененные характеристики [18, 19]. Грунтовые основания, находящиеся под воздействием внешних нагрузок [20–22] и или имеющие улучшения свойств [23], так же не имеют постоянных значений механических характеристик.

В нормативной базе Российской Федерации наименование связного грунта определяется по числу пластичности  $I_p$ , которое является разностью между влажностью на границе текучести  $W_L$  и влажностью на границе раскатывания  $W_P$ : супесь ( $I_p \leq 17\%$ ), суглинок ( $7\% < I_p < 17\%$ ), глина ( $I_p \geq 17\%$ ). Глина является самым распространенным типом осадочных пород. Основными глинистыми минералами являются иллит, каолинит и монтмориллонит. Одним из интересных инженерно-геологических элементов, выделяемых при изыскании, являются высокопластичные глины ( $I_p \geq 25\%$ ). Согласно таблице, разработанной на основании результатов экспериментальных исследований Наяк, Сингх и М.Дас [24, 25], по определению доминирующего минерала с использованием границы Аттерберга для определения доминирующего качественного содержания минералов в грунте, а также диапазона активности различных глинистых минералов в образце грунта, при влажности на границе текучести  $W_L = 0,924$  и числе пластичности  $I_p = 50,8\%$  преобладающим глинистым минералом является иллит. Иллит классифицируется как глинистый минерал листового типа, на основе которого формируется кристаллическая структура и водопоглощающий компонент, незначительно увеличивающийся в объеме при увлажнении. Иллит соединен слабыми связями с ионами калия ( $K^+$ ), слабее, чем связи, связывающие кристаллические единицы каолина, но гораздо прочнее, чем ионные связи, образующие кристаллы монтмориллонита. Иллитовая структура с трудом набухает под влиянием воды между листами. Исследования грунтов с крупными реформированными иллитовыми минералами, проведенные Р.А. Ариеснаван [25, 26], привели к выводу, что иллитовые минералы имеют свойства водопоглощения, а пределы границы раскатывания и показатели пластичности высокие, как у монтмориллонита по сравнению с каолинитом. Содержание воды влияет на величину предельной несущей способности ( $q_u$ ), которая уменьшается с увеличением влажности. Химические свойства иллита могут изменяться из-за того, что минеральная структура иллита разделяется и превращается в более мелкую структуру, образуя монтмориллонит или смесь обоих минералов в результате сушки и смачивания. Данный факт был учтен при создании образцов нарушенной структуры.

Проблема нелинейного деформирования высокопластичной глины нарушенной структуры в условиях трехосного нагружения, возникающая вследствие влияния процентного содержания свободной воды, в существующей литературе практически не обсуждается.

**Целью** данного исследования является анализ влияния содержания воды в грунте и величины среднего нормального напряжения на особенности нелинейного деформирования образцов высокопластичных иллитовых глин нарушенной структуры в условиях трехосного сжатия.

**Задачи** исследования:

- создание цилиндрических образцов высокопластичных глин нарушенной структуры;
- проведение трехосных осесимметричных испытаний;
- определение особенностей деформирования образцов при разных значениях влажности и среднего нормального напряжения;
- математическое описание объемных деформаций образца грунта нарушенной структуры.

## 2. Материалы и методы

Согласно разработанной программе испытаний проведено исследование особенностей деформирования и разрушения высокопластичной иллитовой глины с

нарушенной структурой при нескольких значениях процентного содержания воды в образце и величин среднего нормального напряжения в процессе трехосного стабилметрического нагружения. После сушки и дробления грунт замачивался до заданных значений и отстаивался в эксикаторе, после чего формировался образец [14]. Для создания новой серии образцов применялся новый объем грунта, чтобы исключить влияние повторной сушки в печи на разрушение глинистого минерала иллита.

Образцы цилиндрической формы имели следующие размеры: 76 мм высота и 38 мм диаметр. Статическое девиаторное нагружение ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ) позволяло разрушить образец по схеме «раздавливание» и сформировать плоскость сдвига [27, 28]. Стабилметрические испытания были проведены при двух величинах бокового давления  $\sigma_2 = \sigma_3 = 100$  кПа и  $\sigma_2 = \sigma_3 = 300$  кПа. Девиаторное вертикальное нагружение ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) прикладывалось с постоянной скоростью ступенями, равными 10% от  $\sigma_2 = \sigma_3$ , до разрушения образца. За критерий разрушения согласно конструктивным особенностям испытательного оборудования было принято достижение образцом при нагружении относительной вертикальной деформации в размере  $\epsilon = 0,15$  от исходной высоты грунта, то есть 11,4 мм. Конструкцией испытательного оборудования предусмотрен второй критерий разрушения – достижение образцом относительной горизонтальной деформации, однако, в процессе проведения данных экспериментов оно не было зафиксировано.

Грунт нарушенной структуры имел следующие заданные характеристики: влажность на границе текучести  $W_L = 0,924$ ; влажность на границе раскатывания  $W_P = 0,416$ ; число пластичности  $I_p = 50,8$ . Вариативным параметром являлась начальная влажность:  $W = 38\%$ ;  $W = 40\%$  и  $W = 42\%$ .

### 3. Результаты и обсуждение

Испытания проведены на пневматическом приборе трехосного сжатия, входящим в состав автоматизированного испытательного комплекса АСИС, поэтому графики развития вертикальной деформации образца при нагружении построены автоматически, однако, для удобства проведения анализа, выполнены сводные графики развития деформаций в процессе нагружения (рис. 1). Вертикальные деформации образцов грунта с влажностью  $W=38\%$  и  $W=40\%$  «растут» с равной по величине скоростью, но образцы с меньшим содержанием воды демонстрируют большую прочность в условиях трехосного сжатия.

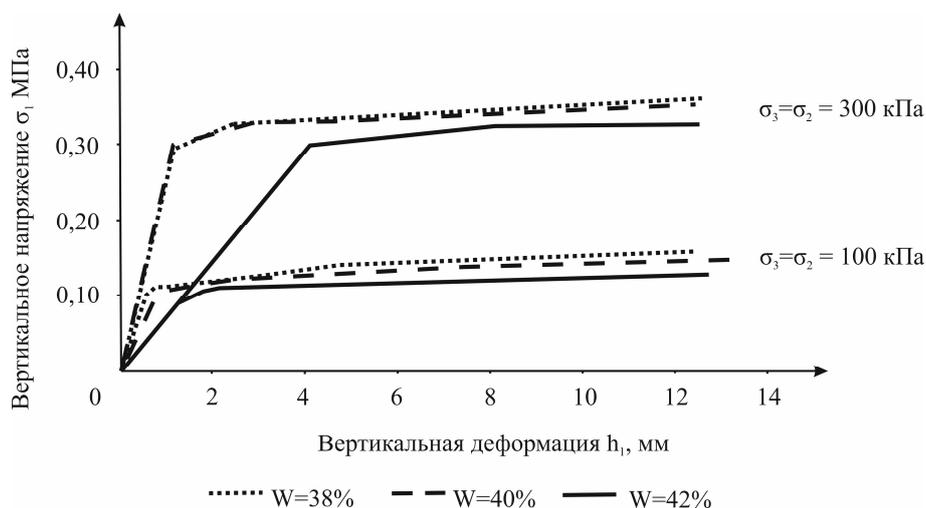


Рис. 1. Влияние условий нагружения на развитие деформаций образца высокопластичного глинистого грунта (иллюстрация автора)

Fig.1. The influence of loading conditions on the development of deformations of a highly plastic clay soil sample (illustration by the author)

Наличие влаги в объеме  $W=42\%$  на первых этапах нагружения значительно увеличивает скорость деформирования образца за счет «отжатия» воды из пор и пустот, то есть свободная пленочная вода, оставшаяся в порах в процессе изготовления образца грунта нарушенной структуры и не успевшая поучаствовать в создании и восстановлении

коллоидных связей, при восприятии нагрузки, являясь несжимаемой, разрушает пору и играет роль «смазки», ускоряя доуплотнение грунта в характерных зонах образца. При меньшей влажности высокопластичных глин в образцах указанный эффект не наблюдается.

Построены сводные графики развития вертикальных деформаций в зависимости от роста девиатора напряжений ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) при заданных программой проведения экспериментов значениях влажности и величины всестороннего обжатия (рис. 2).

В процессе девиаторного нагружения установлено влияние величины всестороннего обжатия на деформирование образца.

Испытания образцов при величине бокового давления  $\sigma_2 = \sigma_3 = 100$  кПа позволили выделить на графике (рис. 2) три характерных участка. На первом этапе ( $\sigma_1 - \sigma_2 \leq 20$  кПа) зависимость между девиатором и вертикальными деформациями носит нелинейный характер и наблюдается незначительный прирост вертикальных деформаций на величину до 2 мм. На втором участке ( $\sigma_1 - \sigma_2 \leq 30$  кПа, вертикальные деформации до 4 мм) скорость деформирования увеличивается за счет включения в работу пленочной воды, при этом следует отметить, что в образцах с содержанием влаги в глине  $W = 38\%$  и  $W = 40\%$  скорость прироста деформаций становится равной. На третьем этапе наступает стадия «течения», когда при постоянной скорости нагружения фиксируется значительный прирост деформаций с последующим достижением предельных величин и разрушением образца. Для случая с влажностью грунта  $W = 42\%$  скорость прироста деформаций выше в 2,5 раза на первом, в 4 раза на втором и в 1,5 раза на третьем этапах соответственно по сравнению с образцами меньшей влажности.

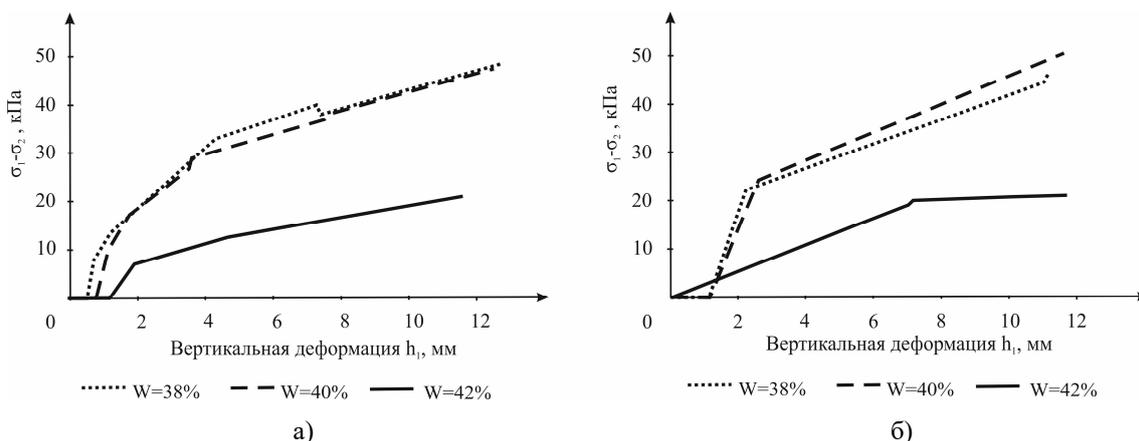


Рис. 2. Влияние роста девиатора напряжений ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) на увеличение вертикальных деформаций образца нарушенного грунта:

а) при  $\sigma_2 = \sigma_3 = 100$  кПа, б) при  $\sigma_2 = \sigma_3 = 300$  кПа  
(иллюстрация автора)

Fig.2. The influence of the growth of the stress deviator ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) on the increase in vertical deformations of a disturbed soil sample:

а) at  $\sigma_2 = \sigma_3 = 100$  kPa, б) at  $\sigma_2 = \sigma_3 = 300$  kPa  
(illustration by the author)

В условиях второго нагружения ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 300$  кПа) на графике деформирования (рис. 2) можно выделить два характерных участка. На первом этапе девиаторного нагружения ( $\sigma_1 - \sigma_2 \leq 20$  кПа) для образцов грунта с влажностью  $W = 38\%$  и  $W = 40\%$  наблюдается незначительный прирост вертикальных деформаций до 2 мм, при этом зависимость более линейная по сравнению с испытанием при меньшей величине боковых нормальных напряжений ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 100$  кПа); на втором этапе фиксируется разрушение образца, которому предшествует быстрый рост линейных деформаций. Увеличение влажности грунта до  $W = 42\%$  приводит к развитию вертикальных деформаций на первом этапе нагружения с большей скоростью (до 3,2 раза) и образец получает деформации, составляющие более 50 % от предельного значения, допускаемого испытательным оборудованием; на втором этапе деформации значительно прирастают без роста девиаторных напряжений.

В процессе испытаний установлено, что на последнем этапе нагружения во всех исследуемых образцах формируются плоскости разрушения. При влажности грунта  $W=38\%$  и  $W=40\%$  у образца наблюдается форма разрушения «сдвиг» с образованием одной характерной плоскости скольжения, при увеличении содержания влаги до  $W=42\%$  в следствии образования нескольких плоскостей формируется «бочка».

После завершения испытаний, образцы высокопластичного грунта были извлечены из оболочек для фотофиксации положения плоскости разрушения (рис. 3). Анализируя полученные фоторезультаты, можно установить, что при содержании влаги в глинистом грунте  $W=38\%$  и  $W=40\%$  у образцов твердой консистенции фиксируется четкая плоскость сдвига с углом наклона от  $50^\circ$  до  $64^\circ$  к горизонту. Следует отметить, что вне зависимости от величины среднего нормального напряжения угол наклона плоскости разрушения в образцах при влажности грунта  $W=38\%$  одинаковый. Увеличение влажности грунта до  $W=42\%$  для обоих вариантов загрузки ( $\sigma_2=\sigma_3=100$  кПа и  $\sigma_2=\sigma_3=300$  кПа) привело к разрушению по форме «бочка», что объясняется возникновением в образце высокопластичных глин полутвердой консистенции множества плоскостей сдвига одновременно, следует заметить, что при рассматриваемом уровне содержания влаги величина горизонтальных (радиальных) деформаций не превышала предельно допустимых 3 мм.

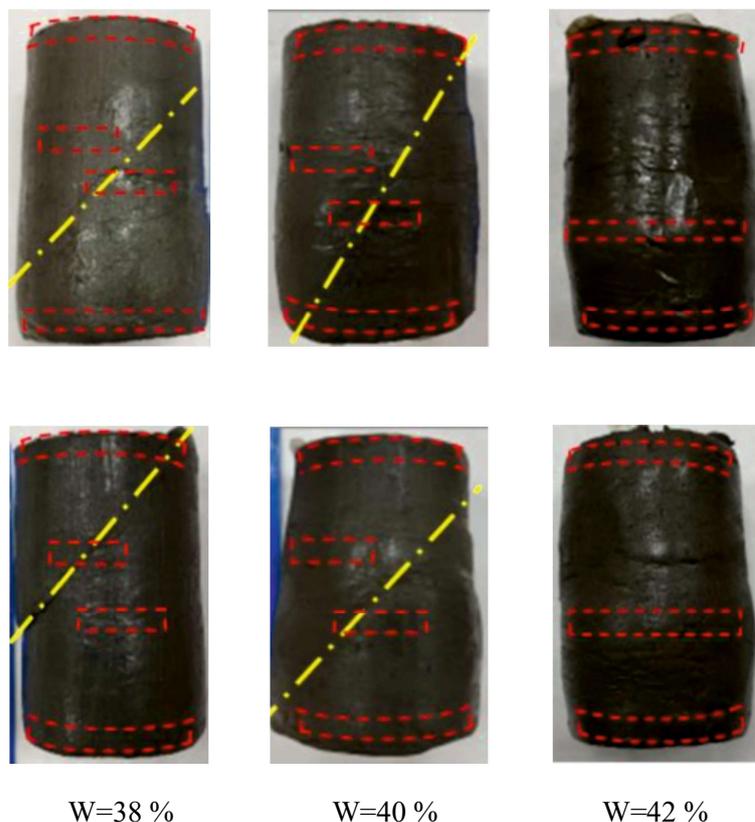


Рис. 3. Фото образцов с формой их разрушения в зависимости от влажности:  
 верхний ряд при  $\sigma_2=\sigma_3=100$  кПа, нижний ряд при  $\sigma_2=\sigma_3=300$  кПа;  
 (иллюстрация автора)

Fig.3. Photos of samples with the shape of their destruction depending on humidity:  
 upper row at  $\sigma_2=\sigma_3=100$  kPa, lower row at  $\sigma_2=\sigma_3=300$  kPa  
 (illustration by the author)

Для разработки проектных геотехнических решений значимыми являются данные об изменении модуля общих деформаций и модуля сдвига грунта. Программное обеспечение комплекса АСИС позволят вычислять значения вышеназванных деформационных характеристик в автоматизированном режиме.

Проведенные исследования показали, что, если в образце содержится 42 % воды, грунт имеет самые низкие из полученных по результатам испытаний значения модуля

общих деформаций. Аналогичная зависимость наблюдается и по результатам анализа данных о модуле объемных деформаций образца: при меньшей из заданных программой испытаний величине влажности образец демонстрирует самое высокое значение модуля объемных деформаций, так как горизонтальные деформации в образце минимальны, а при  $W=42\%$  зафиксирована минимальная величина, так как образцы деформировались во время трехосного нагружения и в вертикальном и в горизонтальном направлении.

Значения модуля сдвиговых деформаций приведены на рисунке 4. Испытания позволили установить, что при увеличении влажности грунта сопротивление образцов сдвигу при трехосном сжатии уменьшается, что подтверждает влияние пленочной воды на процесс деформирования. В условиях бокового давления  $\sigma_2=\sigma_3=300$  кПа модуль сдвига имеет более высокие значения для влажности  $W=38\%$  и  $W=40\%$ , однако, в случае увеличения влажности высокопластичного глинистого грунта выше границы раскатывания ( $W=41,6\%$ ) для обеих схем нагружения ( $\sigma_2=\sigma_3=100$  кПа и  $\sigma_2=\sigma_3=300$  кПа) модуль сдвига имеет одинаковые значения. Данные результаты позволяют сделать вывод о существенном влиянии влажности на деформационные свойства глинистого грунта нарушенной структуры с высоким значением числа пластичности. Следует отметить, что полученные выводы справедливы для образцов, не подвергающихся после изготовления выдержке в эксикаторе до начала испытания, то есть в них в меньшем объеме восстановились разрушенные в процессе приготовления грунта структурные связи.

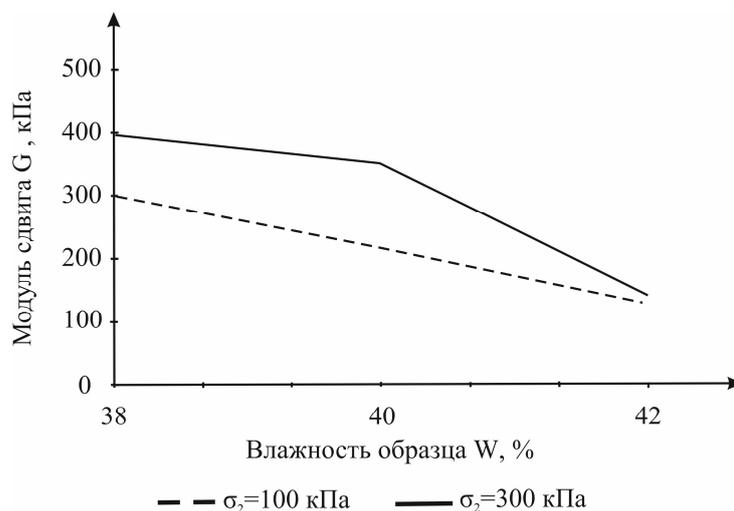


Рис. 4. Влияние влажности на модуль сдвига грунта:  
при  $\sigma_2=\sigma_3=100$  кПа и при  $\sigma_2=\sigma_3=300$  кПа  
(иллюстрация автора)

Fig.4. The influence of humidity on the shear modulus of soil:  
a) at  $\sigma_2=\sigma_3=100$  kPa, b) at  $\sigma_2=\sigma_3=300$  kPa  
(illustration by the author)

Объемную деформацию высокопластичной глины нарушенной структуры, основываясь на анализе результатов проведенных трехосных испытаний, предлагается записать:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^0 \pm \varepsilon_v^D \quad (1),$$

где  $\varepsilon_v^0$  – объемная деформация образца грунта, вызванная всесторонним обжатием;

$\varepsilon_v^D$  – объемная деформация, возникшая в результате осевого воздействия девиатора напряжений.

Учитывая закономерности изменения объемных деформаций, полученные в работах [27, 28], принимаем, что деформации изменения объема и деформации формоизменения развиваются при трехосном осесимметричном нагружении одинаково.

Объемная деформация грунта во времени описывается в соответствии с теорией наследственной ползучести Больцмана-Вольтерра, модифицированной Масловым-Арутюняном применительно к грунтам. Согласно этой теории, полная деформация сдвига или объема при произвольном режиме нагружения записывается в виде:

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma(t)}{K(t)} + \frac{1}{K(t)} \int_{\tau}^t K_V(t, \tau) \cdot \sigma(\tau) \cdot d\tau \quad (2),$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i(t)}{G(t)} + \frac{1}{G(t)} \int_{\tau}^t K_j(t, \tau) \cdot \sigma_i(\tau) \cdot d\tau \quad (3),$$

где  $K(t)$  – модуль объемных деформаций;

$G(t)$  – модуль сдвиговых деформаций;

$K_V(t, \tau)$  – ядро ползучести, представляющее собой скорость сдвиговой деформации при единичном значении интенсивности нагружения;

$K_j(t, \tau)$  – ядро ползучести, представляющее собой скорость объемной деформации при единичном значении среднего напряжения.

Исходя из анализа результатов экспериментальных исследований, получены ядра ползучести  $K_V(t, \tau)$  и  $K_j(t, \tau)$  для грунта при пространственном напряженном состоянии.

Результаты выполненных исследований были сопоставлены с результатами, опубликованными другими исследователями [29–31]. Величины вертикальных деформаций незначительно (до 12%) отличаются между собой, что объясняется различным генезисом исходных грунтов для приготовления образцов.

#### 4. Заключение

1. Проведены исследования деформационных характеристик высокопластичных глин нарушенной структуры в условиях трехосного нагружения. Получены зависимости изменения деформации и формы разрушения образцов от влажности грунта и величины среднего нормального напряжения. Проанализированы графики развития деформаций в зависимости от величины девиатора для каждой серии нагружения.

2. Выявлено, что влажность является основным фактором, влияющим на деформационные характеристики высокопластичных глин нарушенной структуры. Увеличение влажности грунта до 42% практически всегда приводит к уменьшению модулей вертикальной и объемной деформации, а также модуля сдвига и к нелинейному закону деформирования образца с увеличением скорости прироста вертикальных деформаций.

3. Установлено, что форма разрушения образца зависит от содержания влаги в грунте нарушенной структуры и от величины бокового давления при трехосных испытаниях. Влажность, близкая к границе раскатывания высокопластичной глины, приводит к разрушению образца грунта нарушенной структуры в форме «бочка».

4. Предложены выражения для описания объемной деформации грунта в условиях трехосного сжатия.

#### Благодарности

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

#### Acknowledgments

The work was carried out at the expense of a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to educational organizations of higher education, scientific and other organizations to support plans for the development of human resources in terms of stimulating their scientific and teaching staff to defend doctoral theses and perform research.

**Список литературы / References**

1. Колыбин И.В., Попсуенко И.К., Когай В.К. Исследования оползня на склоне реки Москвы // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 1. – С. 25-29. – EDN VTPOJL  
Kolybin I.V., Popsuenko I.K., Kogai V.K. A Study of a Slump in the Moscow River Slope. // Basements, foundations and soil mechanics. No. 1, P. 25-29, January-February, 2016.
2. Сун Х. С., Ли Д.Х., Чен Ю.Д. Поведение тоннеля, вызванное длительной осадкой глинистого грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2025. – № 5. – С. 24. – EDN CVPSVJ  
Song H. S., Li D.H, Chen Yu.D. Tunnel behavior caused by prolonged settlement of clay soil // Basements, foundations and soil mechanics. No. 5, P. 24, 2025.
3. Lunev A.A., Katsarskii R.S. Influence of Water Content and Degree of Compaction on the Mechanical Properties of Soils of Various Geneses // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2022. Vol.59. P. 417–421.
4. Giao P.H. , Thoang Ta Thi, Hoang Hiep Doan Huy Hien, Long Pham, Kieu Nguyen, Nguyen Tien Dung. Geological-geotechnical correlation of a deltaic subsoil profile and characterization of its uppermost soft marine clay deposit with reference to infrastructure development in the Saigon-Dong Nai delta, Vietnam // Bull Eng Geol Environ. 2023. No. 82, 441. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03461-4>.
5. Elhassan A.A.M., Mnzool a M., Smaoui H. b, Jendoubi c A. , Elnaim d B. M.E., Alotaibi M. F. Effect of Clay Mineral Content on Soil Strength Parameters. // Alexand. Eng. J. 2023. 63. P. 475–485.
6. Ural N. The Importance of Clay in Geotechnical Engineering // InTech, 2018. P. 83–102.
7. Димова А.И., Димов И.Л. О возможности определения модуля деформации грунта по лобовому сопротивлению зонда // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2019. – № 6. – С. 8-10.  
Dimova A.I., Dimov I.L. On the possibility of determining the modulus of soil deformation by the drag of the probe. // Basements, foundations and soil mechanics. 2019. No. 6, P. 8-10
8. Borthakur N., Das M. (2025). Predicting Micropile Group Capacity in Soft Cohesive Soil by Artificial Neural Network // Indian Geotechnical Journal. 2024. No. 55. P. 1844–1862. DOI 10.1007/s40098-024-01058-6.
9. He D., Cheng Y., Liu H., Lin H. Pile–Soil Interaction and Group Pile Effect in Composite Foundation Under Different Pile Length Conditions // Buildings 2025, 15, 1248. <https://doi.org/10.3390/buildings15081248> Copyright: ©2025.
10. Мирсаяпов И.Т., Шарафутдинов Р.Ф. Осадки оснований свайных фундаментов с учетом реологических свойств грунтов и конструкций фундаментов // Современные методы проектирования, подземного строительства и реконструкции оснований и фундаментов (GFAC 2024). Сборник тезисов Национальной (всероссийской) научно-технической конференции с международным участием, посвященной 90-летию кафедры геотехники (механики грунтов, оснований и фундаментов, инженерной геологии). Санкт-Петербург. – 2024 – С. 37-38  
Mirsayapov I.T., Sharafutdinov R.F. Settlement of the bases of pile foundations, taking into account the rheological properties of soils and foundation structures // Modern methods of design, underground construction and reconstruction of basements and foundations (GFAC 2024). Collection of abstracts of the National (All-Russian) Scientific and Technical conference with international participation, dedicated to the 90th anniversary of the Department of Geotechnics (mechanics of soils, foundations and foundations, engineering Geology). Saint Petersburg. – 2024 – P. 37-38.
11. Ma Y., He X., Guan Y., Fan D., Gao R., Luo F., Liu S. Sensitivity Analysis of Foundation Soil Physical–Mechanical Properties on Pile Foundation Stability // Buildings 2025, 15, 4001. <https://doi.org/10.3390/buildings15214001>
12. Ершова М.В. Обзор факторов, влияющих на качество лабораторных // Молодой

- ученый. — 2022. — № 48 (443). — С. 49-51.  
Yershova M.V. Review of factors affecting the quality of laboratory tests // *Young scientist*. — 2022. — No. 48 (443). — P. 49–51.
13. Malizia J.P., Shakoor A. Effect of Water Content and Density on Strength and Deformation Behavior of Clay Soils // *Eng. Geol.* 2018. 244. P. 125–131.
  14. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Физико-механические свойства глинистых грунтов при длительном трехосном сжатии // *Вестник гражданских инженеров*. 2011. №1(26). С. 82–87  
Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Physicomechanical properties of clay soil in the conditions of a spatial tension // *Bulletin of Civil Engineers*. 2011. No. 1(26) . P. 82–87.
  15. Rodríguez Cuervo S. Index properties, mineralogy composition and strength of clay soil with the presence of diesel // *SN Applied Sciences*. 2019. No. 1. DOI 10.1007/s42452-018-0092-x.
  16. Liu F., Yi S., Zhou W.-H., Chen Y.-Z., Wong M. (2020). Amendment additions and their potential effect on soil geotechnical properties: A perspective review // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2020. No. 51. P. 1–42. 10.1080/10643389.2020.1729066.
  17. Chen H., Shan W., He X. Influence of Diesel Contamination on Engineering Properties of Soil and Its Mechanism // In: Zhou A, Tao J, Gu X, Hu L (eds) *Proceedings of GeoShanghai 2018 international conference: fundamentals of soil behaviours*. – Springer Singapore, Singapore. 2018. P. 620–627.
  18. Mirsayapov I.T., Aysin N.N. Influence of a deep construction pit on a technical condition of surrounding buildings // *Proceedings of the Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations In: Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, 6–8 February*. – St.-Petersburg, Russia, 2019. P. 197–201.
  19. Song D., Chen Z., Dong L. Monitoring analysis of influence of extra-large complex deep foundation pit on adjacent environment: a case study of Zhengzhou City, China // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2020. Vol. 11, No. 1. P. 2036–2057.
  20. Mirsayapov I., Sharaf H.M.A. Studies of Clay Soils Under Triaxial Block Cyclic Loading // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. 574 LNNS. P. 2378–2386.
  21. Mirsayapov I., Aysin N. Clay Soil Deformations Under Regime Long-Term Triaxial Compression Taking into Account Initial Defects // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. V. 291. P. 99–108.
  22. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Influence of initial defects on the strength of clay soil under triaxial compression // In book: *Smart Geotechnics for Smart Societies*. 2023. P. 417–421. [https://doi.org/ 10.1201/9781003299127-45](https://doi.org/10.1201/9781003299127-45).
  23. Odeh N.A., Al-Rkaby A. H.J. Strength, Durability, and Microstructures characterization of sustainable geopolymer improved clayey soil // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. V. 16. e00988, ISSN 2214-5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00988>.
  24. Musbah A., Mohammed M., Alfghia A. The Effect of Mineral Composition and Quantity of Fines on the Atterberg Limits and Compaction Characteristics of Soils // *Open Journal of Civil Engineering*. 2024. 14. P. 258–276. [https://doi.org/ 10.4236/ojce.2024.142014](https://doi.org/10.4236/ojce.2024.142014).
  25. O’Kelly B.C. Theory of liquid and plastic limits for fine soils, methods of determination and outlook // *Geotech. Res*. 2023. 40. P. 1–9.
  26. O’Kelly B.C. Review of Recent Developments and Understanding of Atterberg Limits Determinations // *Geotechnics*. 2021. 1. P. 59–75. <https://doi.org/10.3390/geotechnics1010004>.
  27. 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. Vol. 48. P. 148–157. <https://doi.org/10.1007/s11204-011-9142-8>.

28. 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. P. 5–11. <https://doi.org/10.1007/s11204-0169356-x>.
29. Hernández-Hernández V., Joya-Cárdenas D., Equihua L., Leal-Vaca J., Diosdado De la Peña J.A., Pérez-Moreno L., Robles N., Saldaña-Robles A. Experimental and numerical analysis of triaxial compression test for a clay soil // Chilean journal of agricultural research. 2021. Vol. 81. P. 357–367. 10.4067/S0718-58392021000300357.
30. Sharafutdinov R.F. Clay soil stiffness under consolidated isotropic drained triaxial tests // Magazine of Civil Engineering. 2023. 121(5). Article No. 12106. DOI: 10.34910/MCE.121.6.
31. Xue K, Wang S, Hu Y and Li M (2020) Creep Behavior of Red-Clay Under Triaxial Compression Condition. Front. Earth Sci. 7:345. doi: 10.3389/feart.2019.00345

#### **Информация об авторах.**

**Королева Ирина Владимировна**, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: ofdsiig.koroleva@bk.ru, ORCID 0000-0003-4475-988X

#### **Information about the authors.**

**Irina V. Koroleva**, Candidate of technical sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: ofdsiig.koroleva@bk.ru, ORCID 0000-0003-4475-988X

*Дата поступления: 19.10.2025*

*Дата принятия: 26.12.2025*