

М.Б. МАРИНИЧЕВ¹, П.А. ЛЯШЕНКО¹, В.В. ДЕНИСЕНКО²

¹ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, Россия

²ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия

МЕХАНИЗМ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТА ПРИ КОМПРЕССИОННОМ СЖАТИИ ПРОБЫ

Аннотация. Деформации пробы глинистого грунта являются следствием сдвигов по поверхностям скольжения. Фронт поверхности скольжения, перемещаясь в нагружаемом грунтовом теле, тормозится на деформационных неоднородностях. Преодоление упругого сопротивления на них происходит со скачком перемещения. Перемещения на группе деформационных неоднородностей кооперативно проявляются в виде скачка осадки пробы грунта при компрессионном сжатии. Деформационные неоднородности представлены, в рамках 2-х компонентной модели деформации, наиболее крупными жёсткими включениями в матрице глинистых частиц и микроагрегатов. Показаны схематично связь перемещения поверхности скольжения с деформациями сжатия пробы, механизм скачкообразности осадки и цикличности скорости осадки. Эффект скачкообразности осадки проявляется как при нагружении пробы, так и при ползучести. Преодоление вязкого трения в глинистой матрице и упругого сопротивления на деформационных неоднородностях вызывает отклонение физической поверхности скольжения от поверхности максимальных касательных напряжений, что создаёт эффект внутреннего трения.

Ключевые слова: деформационная неоднородность, деформация, напряжение, поверхность скольжения, микроагрегат, скорость деформации, ползучесть, скачок скорости.

M.B. MARINICHEV¹, P.A. LYASHENKO¹, V.V. DENISENKO²

¹Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation

²Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

DETERMINATION OF SOIL CREEP DEFORMATIONS

Abstract. Deformations of a clay soil sample are a consequence of shearing along sliding surfaces. The sliding surface front, moving in the loaded soil body, is slowed down by deformation heterogeneities. Overcoming the elastic resistance on them occurs with a displacement jump. Displacements on a group of deformation heterogeneities cooperatively manifest themselves in the form of a jump in the soil sample's settlement under compression. Deformational heterogeneities are represented, within the framework of a 2-component deformation model, by the largest rigid inclusions in the matrix of clay particles and microaggregates. The schematic diagram shows the relationship between the displacement of the sliding surface and the compression deformations of the sample, as well as the mechanism of stepwise settlement and the cyclicity of the settlement rate. The effect of stepwise settlement is observed both during the loading of the sample and during creep. Overcoming viscous friction in the clay matrix and elastic resistance on deformation heterogeneities causes the physical sliding surface to deviate from the surface of maximum tangential stresses, which creates the effect of internal friction.

Keywords: deformation heterogeneities, deformation, stress, sliding surface, microaggregate, settlement rate, creep, velocity jump.

1. Введение

Компрессионное сжатие является распространённым способом испытания грунта для определения его деформационных характеристик. Описание деформаций опирается на представление о грунте как сплошной однородной среде, а компрессионное сжатие рассматривается как изотропное. Зависимость деформации пробы от давления на неё описывается обычно гладкой кривой, не отражающей дисперсный характер грунта.

Однако грунты представляют собой «рыхлые горные породы... несвязные или связные, прочность связей которых во много раз меньше прочности самих минеральных частиц» [1, 2]. Взаимодействие частиц осуществляется посредством контактов между ними [2-7].

Опыт с одноплоскостным сдвигом образца глинистого грунта с постоянной скоростью деформации и непрерывной записью сопротивления позволил увидеть колебания значений последнего [8]. Г.И. Покровский связал колебания реакции с перестройкой микроструктуры грунта и предлагал определять «эффективный диаметр частиц» по амплитуде колебаний, используя их статистическую оценку.

Лабораторные исследования ползучести при сдвиге показали, что её скорость изменяется довольно резко. Это явление было описано Г.И. Тер-Степаняном (1973, 1976, 1988) и объяснено перестройкой микроструктуры грунта: «кривые ползучести в фазе разрушения состоят из кусков парабол; в момент перестройки структуры процесс пересекает от одной возможной параболы на другую, её пересекающую» [9-11].

Эти наблюдения отражают проявление в грунтах «эффекта Портевена-Ле Шателье» (ЭПЛ) – скачкообразного изменения реакции пробы материала при плавном его нагружении [12, 13]. Объяснение ЭПЛ в грунтах возможно только на микроструктурном уровне. К этому есть несколько соображений. «Структурная перестройка вызвана обратимым (а иногда и необратимым) изменением взаимного положения и ориентации частиц пористого тела» [14-16]. «В процессе сдвиговых деформаций отдельные элементы и их группы могут совершать как поступательное, так и вращательное движение» [17-19]. «...в многофазном глинистом грунте происходят два взаимно компенсирующих явления: упрочнение, обусловленное заливанием дефектов и более плотной перекомпоновкой частиц, и разупрочнение, вызванное переориентацией частиц, а также образованием и развитием микротрещин и макротрещин» [20, 21].

Все перечисленные явления присутствуют в процессе компрессионного сжатия, так как в нём возникают сдвиговые деформации, приводящие, в общем, к изменению объёма пробы [2, 22, 23]. При этом деформация сжатия пробы увеличивается скачкообразно при плавном нагружении и при ползучести после его окончания, т. е. наблюдается ЭПЛ.

В настоящей статье поставлена задача объяснения механизма ЭПЛ с использованием микроструктурной модели деформаций грунта.

Задача решается на основе:

1) устойчиво наблюдаемом скачкообразном увеличении деформации пробы грунта при росте давления с постоянной скоростью и непрерывной записи осадки пробы как при нагружении, так и при постоянном давлении;

2) представления об определяющей роли сдвиговых деформаций грунта в сопротивлении и деформациях пробы;

3) измерений параметров скачков сопротивления и деформаций пробы при компрессионном испытании методом ПВН.

2. Модели и методы

Для примера рассмотрим деформации пробы твёрдого суглинка ненарушенной структуры при компрессионном сжатии и ползучести при конечном давлении. Площадь торца пробы 60 см^2 , высота пробы 25 мм.

Испытание пробы при компрессионном сжатии производилось в режиме постоянно возрастающей нагрузки (ПВН). Осевое давление на торце пробы создавалось гирей, движущейся по рычагу с заданной скоростью, и вычислялось по формуле:

$$\sigma = B_p t_p, \quad (1)$$

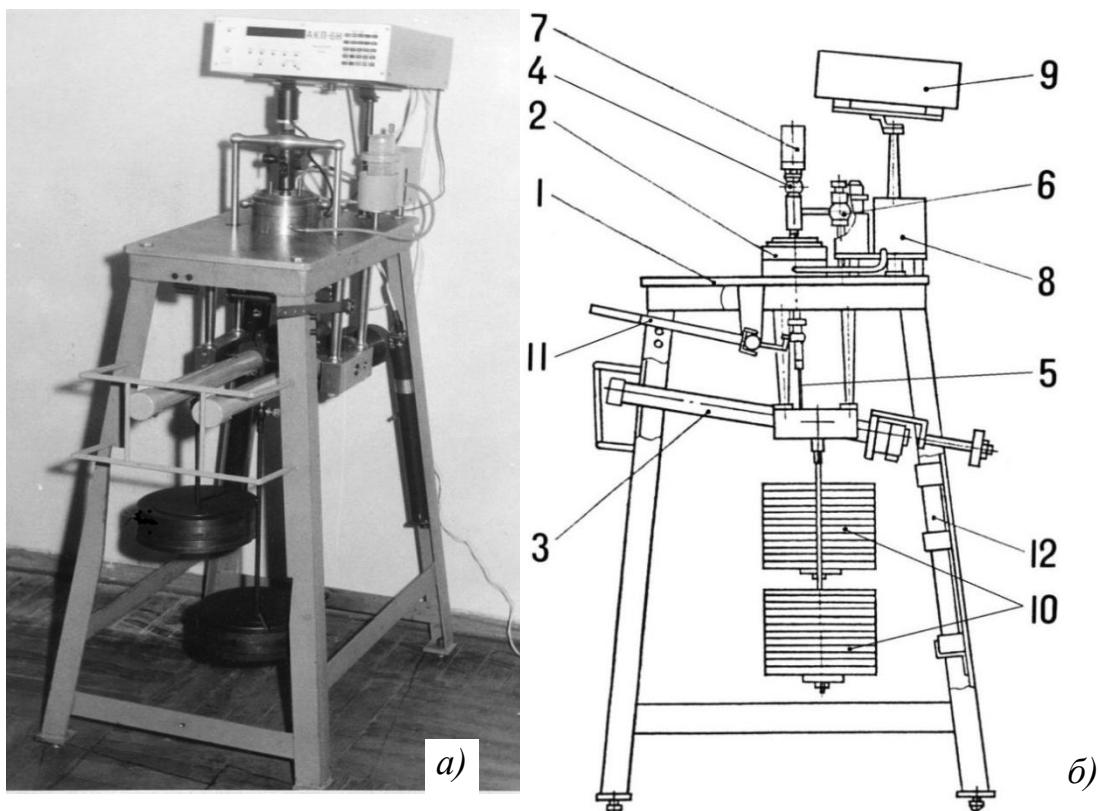
где B_p – скорость увеличения осевого давления на пробу;

t_p – время с начала нагружения.

Значение $B_p = 40$ кПа/ч поддерживалось постоянным с коэффициентом вариации 0,191.

Нагружение гирей через рычаг с плечом переменной длины создаёт условия гравитационного статического нагружения пробы, подобные условиям нагружения грунта в основании строящегося сооружения. Осадка s пробы измерялась непрерывно и регистрировалась с шагом $\Delta s_p = 0,005$ мм.

Испытание пробы производилось на автоматизированном компрессионном приборе с постоянно возрастающей нагрузкой АКП-6Н (рисунок 1), обеспечивающем плавное приложение постоянно возрастающей нагрузки, статическое действие и постоянство приложенной нагрузки независимо от величины осадки образца грунта, что в наибольшей степени моделирует условия работы грунтовых оснований при строительстве [24].



1 – стол-основание; 2 – одометр; 3 – нагруженный механизм; 4 – нагруженная рамка; 5 – гибкая тяга;
6 – реперная стойка; 7 – измеритель осадки штампа; 8 – устройство для замачивания грунта;
9 – блок управления; 10 – грузы постоянной массы; 11 – устройство для подъема нагруженной рамки;
12 – блок резервного питания

Рисунок 1 – Автоматический компрессионный прибор с постоянно возрастающей нагрузкой АКП-6Н:
а) – внешний вид; б) – общий вид

График " $s_p - \sigma_p$ " показывает неравномерное увеличение осадки (рисунок 2, а). График скорости осадки " $f_p - \sigma_p$ " имеет циклический характер (рисунок 2, б).

$$f_p = \bar{s}_p / \Delta t_p, \quad (2)$$

где Δt_p – интервал времени, за который осадка изменилась на величину \bar{s}_p .

Испытание той же пробы на ползучесть производилось при конечном значении давления $\sigma_{end} = 55$ кПа. После нагружения наблюдение за осадкой ползучести при постоянном давлении продолжалось еще 15,25 часа до стабилизации скорости осадки. Осадка ползучести s_{crp} пробы измерялась непрерывно и регистрировалась с шагом $\bar{\Delta}s_{crp} = 0,005$ мм.

График " $s_{crp} - t_{crp}$ " показывает неравномерное увеличение осадки ползучести (рисунок 3, а). График скорости осадки " $f_{crp} - t_{crp}$ " имеет циклический характер (рисунок 3, б).

$$f_{crp} = \bar{\Delta}s_{crp}/\Delta t_{crp}, \quad (3)$$

где Δt_{crp} – интервал времени, за который осадка изменилась на величину $\bar{\Delta}s_{crp}$.

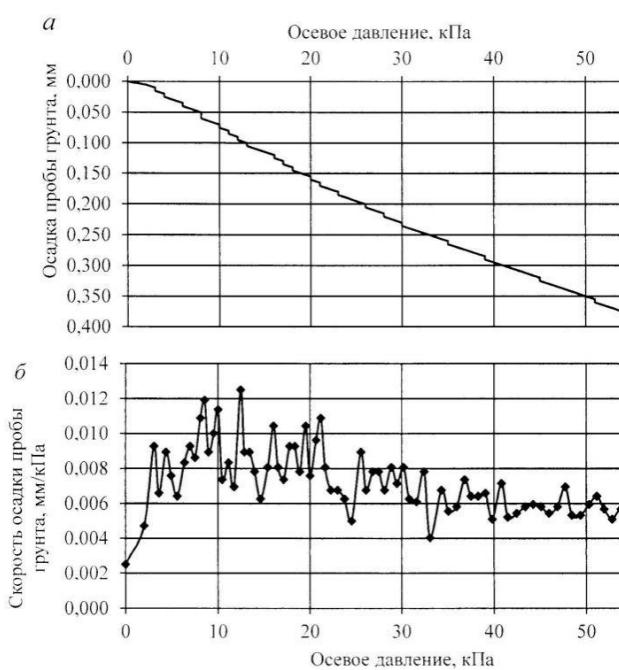


Рисунок 2 – Графики при нагружении пробы твёрдого суглинка ненарушенной структуры:
а) – осадки; б) – скорости осадки

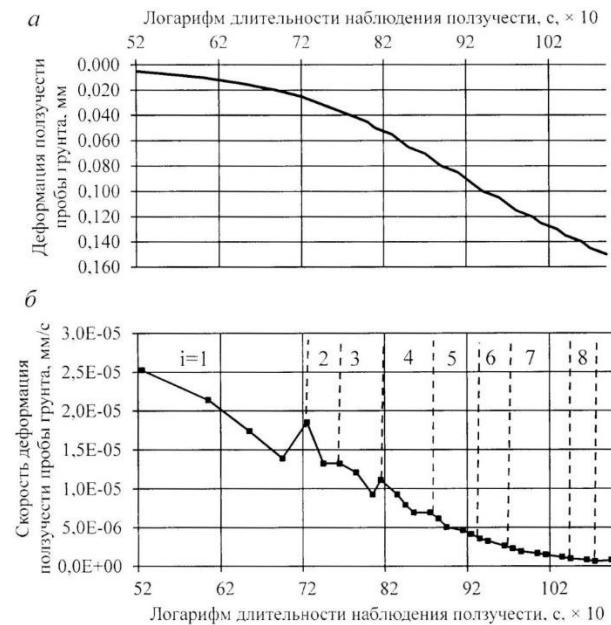
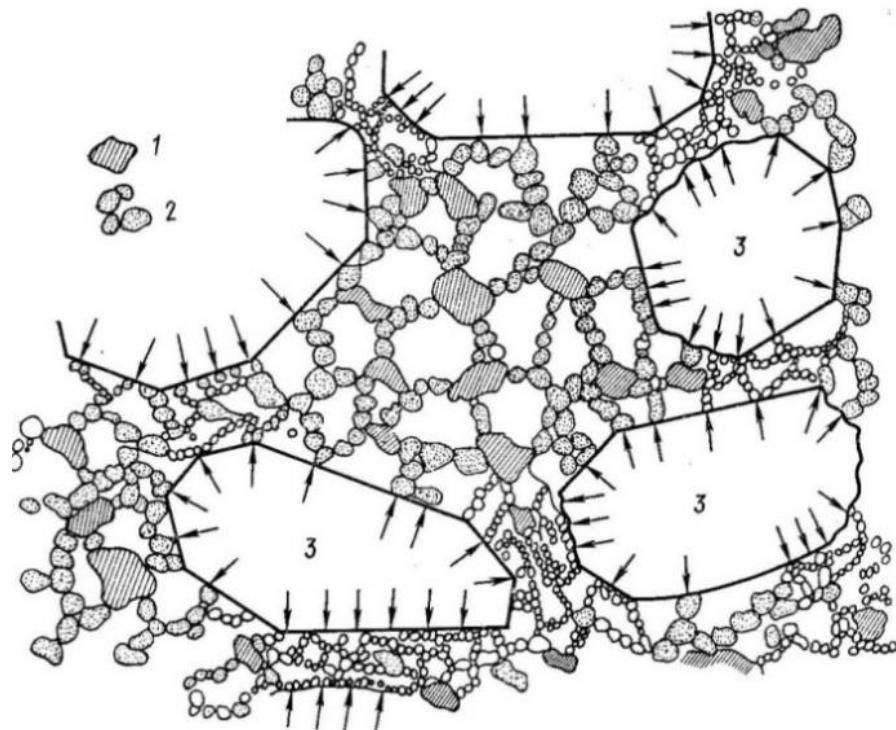


Рисунок 3 – Графики пробы твёрдого суглинка ненарушенной структуры:
а) – осадки; б) – скорости деформации ползучести

Влияние деформационной неоднородности грунта на пластические деформации грунтового тела

Данные испытания с ПВН наглядно показывают скачкообразное увеличение осадки и, соответственно, циклический характер скорости осадки – как при плавном увеличении давления, так и при его постоянном значении. Это – следствие «сыпучести» и неоднородности грунта, являющимися его неотъемлемыми свойствами. Неоднородность выражена, в основном, различиями в размерах твёрдых элементов грунта и характеризуется гранулометрическим составом [2, 4, 6, 7]. Микротекстура глинистых грунтов хорошо изучена (рисунок 4) и может служить отправной позицией для объяснения механизма деформаций.

Распределение внутренних деформаций и усилий в грунтовом теле от внешней нагрузки происходит посредством контактов между элементами микроструктуры [4, 6, 7]. Известно, что «при компрессионном сжатии одновременно с объемными деформациями развиваются и сдвиговые деформации...» [23]. Обычно сдвиговые деформации не измеряются при компрессионном сжатии пробы грунта и не учитываются при расчётах осадки основания фундамента. Но именно на них влияет деформационная неоднородность.



*Рисунок 4 – Модель микротекстуры глинистого грунта по А. Казагранде [2]:
1 – микроагрегаты глинистых частиц; 2 – песчаные и пылеватые зерна*

Суть этого влияния в том, что на контактах крупных жёстких частиц (песчаных и пылевых) с массой мелких (глинистых частиц и их микроагрегатов) возникают площадки сдвиговых деформаций, развивающиеся в поверхности скольжения, перемещения по которым доступны измерениям.

Деформационная неоднородность только частично порождается гранулометрической неоднородностью, но не тождественна ей, так как не является присущим грунту свойством, а определяется, в числе многих факторов, условиями разрушения при нагружении грунтового тела.

Примем микроструктурную модель деформаций грунта в виде 2-х компонентной среды, состоящей из матрицы глинистых частиц и их микроагрегатов (МА), в которую погружены наиболее крупные зёрна (НКЗ) неглинистых минералов. При нагружении грунтового тела на контактах матрицы с НКЗ концентрируются напряжения. Они разрушают матрицу, образуя в ней площадки сдвига (ПлС) вблизи НКЗ. НКЗ, имея намного большую жёсткость, играют роль «затравки» разрушения матрицы сдвигом на своих гранях.

ПлС образуются одновременно на фронте поверхности максимальных касательных напряжений $\Omega(\tau_{max} = const)$, когда τ_{max} достигнут предела сдвиговой прочности глинистой матрицы $\tau_{lim.m}$ вблизи группы НКЗ с одинаковыми напряженно-деформированными условиями. ПлС объединяются в поверхность скольжения (ПС), в результате кооперативной реакции группы ПлС на внешнюю нагрузку. Момент образования ПС регистрируется на границе грунтового тела со штампом прибора, как скачок деформации сжатия. ПС начинается от этой границы, как от жёсткого тела, и продолжается в глинистой матрице на поверхности $\Omega(\tau_{max} = \tau_{lim.o})$ (рисунок 5), где $\tau_{lim.o}$ – предел сдвиговой прочности глинистой матрицы между НКЗ: $\tau_{lim.o} < \tau_{lim.m}$.

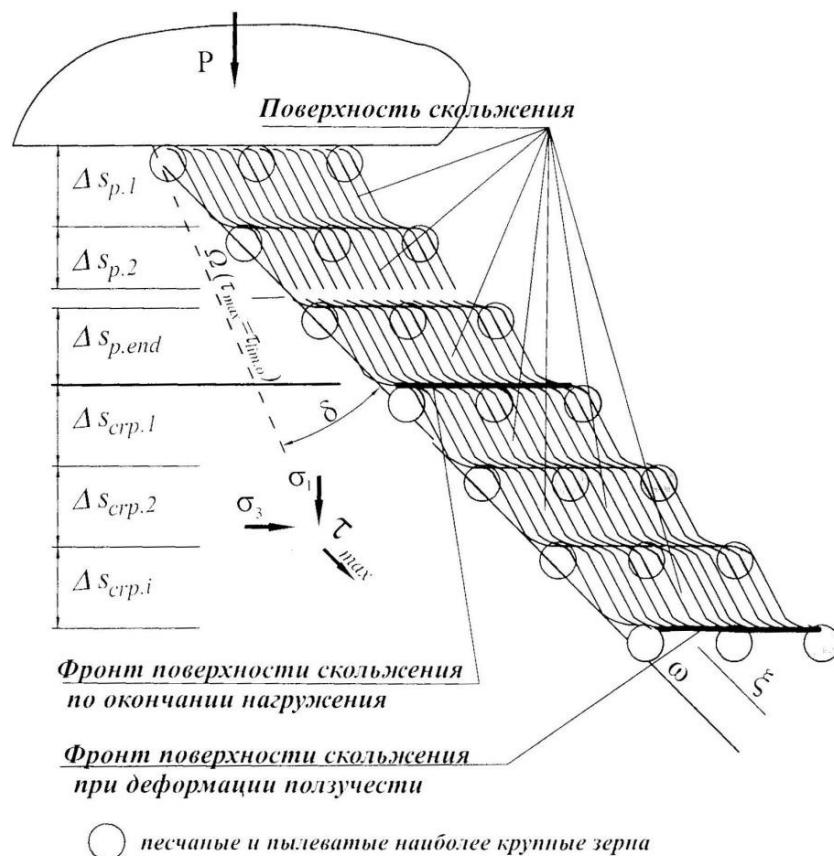


Рисунок 5 – Схема формирования поверхности скольжения на деформационных неоднородностях и приращений осадки на каждом шаге перемещения её фронта

Развитие ПС происходит в направлении, задаваемом вектором $\vec{\xi} = -\text{grad } \{\tau_{max}(x,y,z)\}$. Фронт ПС перемещается под действием неуравновешенного касательного напряжения:

$$\Delta\tau_p = \tau_{max} - \tau_{lim}, \quad (4)$$

где $\Delta\tau_p$ и τ_{max} – неуравновешенная часть и максимальное касательное напряжение на ПС, соответственно; τ_{lim} – обобщённая сдвиговая прочность 2-х компонентной среды.

Шаг перемещений фронта ПС определяется размерами включений и расстояниями между ними, а скорость – скоростью увеличения τ_{max} , т. е. величиной B_p . Измеренные приращения осадки пробы являются проекцией на ось пробы перемещения ПС при кооперативном сдвиге на группе ПлС. Значения приращений осадки Δs_p и Δs_{crp} соответствуют циклам скорости деформации (ЦД) на графике " $f_p - \sigma_p$ ".

Сопротивление грунта на поверхности скольжения при нагружении пробы

На каждом шаге матрица МА оказывает вязкое сопротивление сдвигу на поверхности Ω между группами НКЗ и упругое – на контакте матрицы с НКЗ. Из-за упругого торможения скорость движения ПС уменьшается на участке ab (рисунок 6, а), что приводит к уменьшению скорости осадки пробы до значения $f_{p,min}$ (рисунок 6, в). Напряжения в матрице на контакте с НКЗ увеличиваются, пока в ней не накопится упругая энергия, достаточная для сдвига матрицы по поверхности НКЗ.

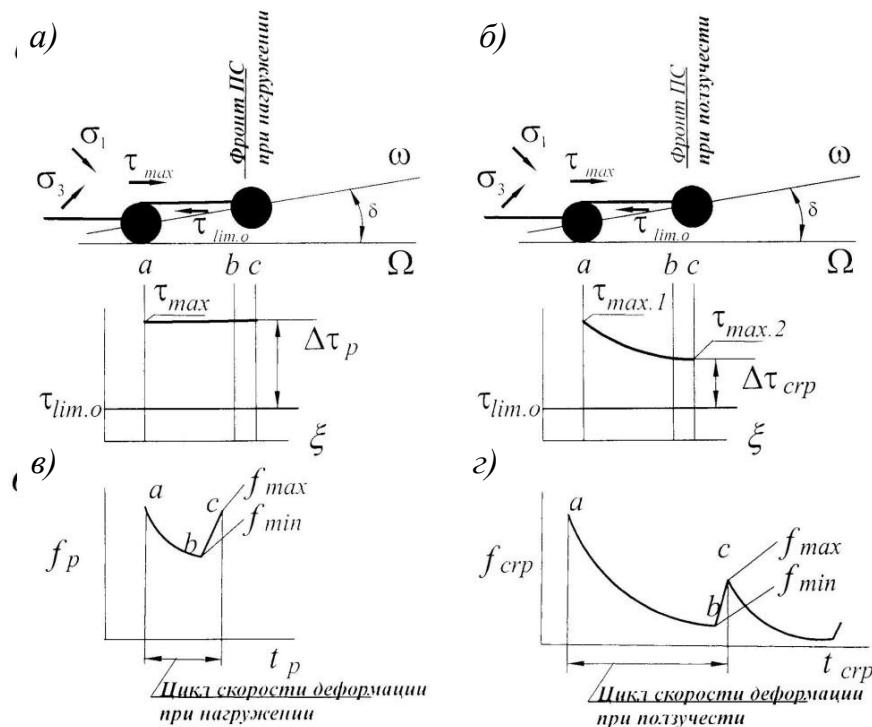


Рисунок 6 – Схема развития поверхности скольжения в грунте и изменения скорости осадки пробы:
а) и в) – при нагружении пробы; б) и г) – при ползучести

Разрушение сдвигом по поверхности НКЗ на участке bc происходит с обходом НКЗ. Оно имеет хрупкий характер, его скорость больше скорости увеличения внешней нагрузки, поэтому кооперативный эффект от сдвига на группе НКЗ выражается в увеличении скорости осадки пробы до значения $f_{p,max}$. В целом, два участка графика скорости, ab и bc , составляют ЦД, на котором осадка пробы увеличивается на Δs_p .

Продолжающееся нагружение пробы активирует матрицу МА и следующую группу НКЗ, вызывая новое перемещение фронта ПС в направлении вектора $\vec{\xi}$ и новое приращение осадки пробы.

В целом по пробе, физическая ПС обходит группы НКЗ, отклоняясь от поверхности $\Omega(\tau_{max} = \tau_{lim})$ на угол δ , связанный с углом внутреннего трения грунта ϕ соотношением $\delta = \phi/2$. Так деформационная неоднородность проявляет себя, создавая эффект внутреннего трения грунта.

Сопротивление грунта на поверхности скольжения при постоянном давлении на пробу

После достижения заданного внешнего давления на пробу её деформация продолжается в виде ползучести. Осадка ползучести s_{crp} изменяется скачками, её скорость изменяется циклически, уменьшается, в общем, с течением времени наблюдения ползучести t_{crp} (рисунки 6, б и 6, г).

Согласно предложенной модели (рисунок 5), осадка ползучести является проявлением движения фронта ПС теми же шагами, что и при нагружении. На 1-м шаге оно происходит в виде вязкого скольжения на участке ab (рисунок 6, б) под действием неуравновешенного касательного напряжения:

$$\Delta\tau_{crp,1} = \tau_{max,1} - \tau_{lim}, \quad (5)$$

где $\Delta\tau_{crp,1}$ и $\tau_{max,1}$ – неуравновешенная часть и максимальное касательное напряжение на ПС в момент прекращения нагружения, соответственно.

В направлении вектора $\vec{\zeta}$ максимальное касательное напряжение снижается на участке ab (рисунок 6, 2), т. е. $\tau_{max,1} < \tau_{max}$. Соответственно, скорость вязкого скольжения становится меньше, чем при нагружении:

$$f_{crp,min.1} < f_{p,min}. \quad (6)$$

Для преодоления группы НКЗ необходима та же упругая энергия, что и при нагружении. Но она накапливается за больший промежуток времени $\Delta t_{crp,1} > \Delta t_p$. Накопленная энергия разрушает матрицу на контакте с НКЗ 1-й группы. Сдвиг на участке bc происходит хрупко, со скоростью, большей скорости скольжения на участке ab . Кооперативный эффект выражается в увеличении скорости осадки пробы до значения $f_{crp,max}$.

1-й цикл деформации ползучести (ЦДП) завершается.

Во 2-м ЦДП $\tau_{max,2} < \tau_{max,1}$. В 3-м и последующих ЦДП $\tau_{max,i} < \tau_{max,i-1}$.

Соответственно, скорость ползучести с каждым ЦДП снижается:

– во 2-м ЦДП:

$$f_{crp,min.2} < f_{crp,min.1}, \quad (7)$$

– вообще, в i -м ЦДП:

$$f_{crp,min.i} < f_{crp,min.i-1}, \quad (8)$$

пока разность в правой части формулы для неуравновешенной части касательного напряжения

$$\Delta\tau_{crp,i} = \tau_{max,i} - \tau_{lim}, \quad (9)$$

не обратится в нуль.

Ползучесть пробы при этом завершается.

Следует отметить, что длительность ЦД определяется скоростью увеличения τ_{max} , т. е. внешним фактором. Длительность ЦДП – сочетанием внешних факторов – τ_{max} – и внутренних, присущих испытуемому грунту, в частности значением τ_{lim} . Поэтому реологические параметры микроструктурной модели деформаций, полученные на этапе ползучести, имеют большую надёжность, чем на этапе нагружения.

3. Результаты исследования и их анализ

Проведенные компрессионные испытания пробы твёрдого суглинка ненарушенной структуры выявили принципиально важную особенность деформирования: как в процессе нагружения с постоянной скоростью увеличения давления, так и на стадии ползучести при постоянном давлении, осадка образца увеличивается не плавно, а скачкообразно. Графики осадки во времени демонстрируют серию дискретных скачков, а графики скорости осадки – выраженный циклический характер. Это однозначно свидетельствует о том, что деформация грунта при компрессионном сжатии не является непрерывным однородным процессом, а состоит из последовательности дискретных актов перестройки его микроструктуры. На стадии ползучести амплитуда скачков скорости постепенно затухает, что указывает на затухающий характер релаксационных процессов после приложения нагрузки.

Полученные экспериментальные данные находят последовательное объяснение в рамках предложенной двухкомпонентной микроструктурной модели. Согласно этой модели, скачки осадки интерпретируются как кооперативный результат формирования и лавинообразного распространения поверхностей скольжения, возникающих на фронте максимальных касательных напряжений. Эти поверхности образуются путем объединения локальных площадок сдвига, которые формируются в глинистой матрице вблизи наиболее крупных жёстких зёрен, играющих роль деформационных неоднородностей. Перемещение фронта поверхности скольжения тормозится на этих включениях из-за их высокого упругого сопротивления, что соответствует фазе замедления скорости осадки. Накопленная упругая энергия высвобождается в момент хрупкого сдвига матрицы по поверхности жёсткого включения, что регистрируется как скачок деформации и резкое увеличение скорости.

Таким образом, анализ результатов подтверждает, что ключевой причиной наблюдаемой скачкообразности деформаций является дискретное, структурно-обусловленное взаимодействие сдвигов в глинистой матрице с жёсткими неоднородностями. Этот же механизм объясняет и макроскопическое проявление внутреннего трения, поскольку физическая поверхность скольжения, вынужденная обходить включения, отклоняется от теоретической поверхности максимальных касательных напряжений. Следовательно, деформационная неоднородность грунта, представленная в модели наиболее крупными жёсткими зёрнами, является фундаментальным фактором, определяющим не только скачкообразный характер деформирования, но и его реологические особенности на стадии ползучести.

4. Заключение

1. Деформационная неоднородность грунта порождает скачкообразное увеличение осадки пробы грунта в процессе компрессионного сжатия. Она выявляется при испытании постоянно возрастающей нагрузкой с непрерывным наблюдением за осадкой пробы при нагружении и ползучести с регистрацией данных с шагом не более 0,005 мм.

2. Объяснение скачкообразного изменения осадки пробы глинистого грунта возможно с использованием микроструктурной модели деформаций. В рамках 2-х компонентной модели деформации, деформационная неоднородность грунта представлена наиболее крупными жёсткими включениями в матрице глинистых частиц и микроагрегатов.

3. При нагружении пробы в грунте образуются поверхности скольжения, объединяющие площадки сдвига, возникающие в местах концентрации напряжений на контактах глинистых частиц и микроагрегатов с наиболее крупными жёсткими включениями. Перемещение (медленное) фронта поверхности скольжения происходит внутри глинистой матрицы с торможением на жёстких включениях, чередуясь с перемещением (быстрым) при обходе их поверхностью скольжения. Эти перемещения наблюдаются при нагружении и при ползучести вследствие кооперативной реакции площадок сдвига на внешнюю нагрузку и наблюдаются как при нагружении, так и при ползучести.

4. Деформационная неоднородность грунта является причиной отклонения физической поверхности скольжения от поверхности максимальных касательных напряжений, известного как «эффект внутреннего трения».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цытович Н.А., Зарецкий Ю.К., Малышев М.В. и др. Прогноз скорости осадок оснований сооружений (консолидация и ползучесть многофазных грунтов). М.: Стройиздат, 1967. 239 с.
2. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.
3. Вялов С.С. Кинетическая теория деформирования грунтов // Тр. второго Всесоюз. симп. по реологии грунтов. Ереван: Изд-во Ереванского ун-та, 1976. С. 22-40.
4. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов (Основные компоненты грунта и их взаимодействие). М.: Стройиздат, 1973. 375 с.
5. Малышев М.В. Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений. М.: Стройиздат, 1980. 136 с.
6. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
7. Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы / Под ред. акад. Е.М. Сергеева. М.: Недра, 1985. 288 с.
8. Покровский Г.И. Исследования по физике грунтов. М.-Л.: Главная редакция строительной литературы, 1937.
9. Тер-Степанян Г.И. Теория ползучести глины при сдвиге и её экспериментальное подтверждение // Тр. Всесоюз. симпоз. по реологии грунтов. Ереван: Изд-во Ереванского ун-та, 1976. С. 74-97.
10. Yang A., Liu T., Zhang H.*, Zhang B. A study on the creep characteristics of gassy clay mixed with silt // Applied Sciences (Basel). 2025. Vol. 15, № 9. Pp. 5106. DOI: 10.3390/app15095106.
11. Zhou F., Wang L., Liu H. A fractional elasto-viscoplastic model for describing creep behavior of soft soil // Acta Geotechnica. 2021. Vol. 16, № 1. Pp. 67-76. DOI: 10.1007/s11440-020-01008-5.

12. Мирзоев К.М., Николаев А.В. Скачкообразность пластических деформаций и возможности управляемого снятия накопленных напряжений // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 3. С. 12-30.
13. Sharafutdinov R. F. Laboratory and in-situ investigations of deviatoric creep in overconsolidated clay soils // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2025. Vol. 62. Pp. 25-33. DOI: 10.1007/s11204-025-10024-0.
14. Денисов Н.Я. Некоторые особенности деформаций глинистых пород // Природа прочности и деформаций грунтов. М.: Стройиздат, 1972. С. 85-89.
15. Han J., Yin Z.Y., Dano C. et al. Cyclic and creep combination effects on the long-term undrained behavior of overconsolidated clay // Acta Geotechnica. 2021. Vol. 16, № 4. Pp. 1027-1041. DOI: 10.1007/s11440-020-01078-5.
16. Olek B.S. Experimental insights into consolidation rates during one-dimensional loading with special reference to excess pore water pressure // Acta Geotechnica. 2020. Vol. 15, № 12. Pp. 3571-3591. DOI: 10.1007/s11440-020-01042-3.
17. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Физика почвы: монография. М.: Изд-во Наука, 1967. 583 с.
18. Xue K., Wang S., Hu Y. et al. Creep behavior of red-clay under triaxial compression condition // Frontiers in Earth Science. 2019. Vol. 7. P. 345. DOI: 10.3389/feart.2019.00345.
19. Mohammad Rezania M., Bagheri M., Mousavi Nezhad M. Creep and consolidation of a stiff clay under saturated and unsaturated conditions // Canadian Geotechnical Journal. 2020. Vol. 57, № 5. Pp. 728-741. DOI: 10.1139/cgj-2018-0398.
20. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Влияние процесса упрочнения на прочность глинистого грунта при режимном трехосном нагружении // Известия КГСАУ, 2017, № 1(39) С. 145-152.
21. Yin Q., Zhao Y., Gong W. et al. A fractal order creep-damage constitutive model of silty clay // Acta Geotechnica. 2023. Vol. 18, № 12. Pp. 3997-4016. DOI: 10.1007/s11440-023-01815-6.
22. Ляшенко П.А., Денисенко В.В., Мариничев М.Б. Испытания грунта и расчёты основания фундамента: монография. Краснодар: КубГАУ, 2025. 152 с.
23. Тер-Мартиросян З.Г. Механика грунтов. М.: Изд-во АСВ, 2005. 488 с.
24. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Совершенствование метода компрессионных испытаний грунтов постоянно возрастающей нагрузкой: монография. Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2017. 173 с.

REFERENCES

1. Tsytovich N.A., Zaretsky Yu.K., Malyshev M.V., et al. *Forecast of settlement rate of foundations of structures (consolidation and creep of multiphase soils)*. Moscow: Stroyizdat, 1967. 239 p.
2. Tsytovich N.A. *Soil mechanics*. Moscow: Vysshaya Shkola, 1983. 288 p.
3. Vyalov S.S. Kinetic theory of soil deformation. *Proceedings of the Second All-Union Symposium on Soil Rheology*. Yerevan: Yerevan University Press, 1976. Pp. 22-40.
4. Goldstein M.N. *Mechanical properties of soils (Main components of soil and their interaction)*. Moscow: Stroyizdat, 1973. 375 p.
5. Malyshev M.V. *Soil strength and stability of building foundations*. Moscow: Stroyizdat, 1980. 136 p.
6. Osipov V.I., Sokolov V.N. *Clays and their properties*. Moscow: GEOS, 2013. 576 p.
7. Sergeev E.M. (Ed.) *Theoretical foundations of engineering geology. Physical and chemical foundations*. Moscow: Nedra, 1985. 288 p.
8. Pokrovsky G.I. *Research in soil physics*. Moscow-Leningrad: Main editorial office of construction literature, 1937.
9. Ter-Stepanyan G.I. Theory of clay creep under shear and its experimental confirmation. *Proceedings of the All-Union Symposium on Soil Rheology*. Yerevan: Yerevan University Press, 1976. Pp. 74-97.
10. Yang A., Liu T., Zhang H., Zhang B. A study on the creep characteristics of gassy clay mixed with silt. *Applied Sciences (Basel)*. 2025. Vol. 15. No. 9. P. 5106. DOI: 10.3390/app15095106.
11. Zhou F., Wang L., Liu H. A fractional elasto-viscoplastic model for describing creep behavior of soft soil. *Acta Geotechnica*. 2021. Vol. 16. No. 1. Pp. 67-76. DOI: 10.1007/s11440-020-01008-5.
12. Mirzoev K.M., Nikolaev A.V. Jump-like nature of plastic deformations and possibilities of controlled removal of accumulated stresses. *Geophysical research*. 2015. Vol. 16. No. 3. Pp. 12-30.
13. Sharafutdinov R.F. Laboratory and in-situ investigations of deviatoric creep in overconsolidated clay soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2025. Vol. 62. Pp. 25-33. DOI: 10.1007/s11204-025-10024-0.
14. Denisov N.Ya. Some features of deformations of clay rocks. *The nature of strength and deformations of soils*. Moscow: Stroyizdat, 1972. Pp. 85-89.
15. Han J., Yin Z.Y., Dano C. et al. Cyclic and creep combination effects on the long-term undrained behavior of overconsolidated clay. *Acta Geotechnica*. 2021. Vol. 16. No. 4. Pp. 1027-1041. DOI: 10.1007/s11440-020-01078-5.
16. Olek B.S. Experimental insights into consolidation rates during one-dimensional loading with special reference to excess pore water pressure. *Acta Geotechnica*. 2020. Vol. 15. No. 12. Pp. 3571-3591. DOI: 10.1007/s11440-020-01042-3.

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

17. Nerpin S.V., Chudnovsky A.F. *Soil Physics: monograph*. Moscow: Nauka Publishing House, 1967. 583 p.
18. Xue K., Wang S., Hu Y. et al. Creep behavior of red-clay under triaxial compression condition. *Frontiers in Earth Science*. 2019. Vol. 7. P. 345. DOI: 10.3389/feart.2019.00345.
19. Mohammad Rezania M., Bagheri M., Mousavi Nezhad M. Creep and consolidation of a stiff clay under saturated and unsaturated conditions. *Canadian Geotechnical Journal*. 2020. Vol. 57. No. 5. Pp. 728-741. DOI: 10.1139/cgj-2018-0398.
20. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Influence of the hardening process on the strength of clay soil under regime triaxial loading. *Izvestiya KGSAU*. 2017. No. 1(39). Pp. 145-152.
21. Yin Q., Zhao Y., Gong W. et al. A fractal order creep-damage constitutive model of silty clay. *Acta Geotechnica*. 2023. Vol. 18. No. 12. Pp. 3997-4016. DOI: 10.1007/s11440-023-01815-6.
22. Lyashenko P.A., Denisenko V.V., Marinichev M.B. *Soil testing and foundation base calculations: monograph*. Krasnodar: KubSAU, 2025. 152 p.
23. Ter-Martirosyan Z.G. *Soil mechanics*. Moscow: ASV Publishing House, 2005. 488 p.
24. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. *Improving the method of compression testing of soils with constantly increasing load: monograph*. Krasnodar: KubSTU Publishing House, 2017. 173 p.

Информация об авторах:

Мариничев Максим Борисович

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, Россия, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры оснований и фундаментов.

E-mail: marinichev@list.ru

Ляшенко Павел Алексеевич

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, Россия, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры оснований и фундаментов.

E-mail: lyseich1@yandex.ru

Денисенко Виктор Викторович

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры кадастра и геоинженерии.

E-mail: denvivi@yandex.ru

Information about authors:

Marinichev Maxim B.

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilina, Krasnodar, Russia,
doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department of foundations and foundations.
E-mail: marinichev@list.ru

Lyashenko Pavel Al.

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilina, Krasnodar, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor, professor of the department of foundations and foundations.
E-mail: lyseich1@yandex.ru

Denisenko Viktor V.

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of cadastre and
geoengineering.
E-mail: denvivi@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10.10.2025
Одобрена после рецензирования 09.11.2025
Принята к публикации 11.11.2025

The article was submitted 10.10.2025
Approved after reviewing 09.11.2025
Accepted for publication 11.11.2025