
**ГРУНТОВЕДЕНИЕ
И МЕХАНИКА ГРУНТОВ**

УДК 624.131.4

ХАРАКТЕР ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ С ПОЗИЦИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

© 2022 г. Ф. С. Карпенко^{1,*}

¹ *Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия*

**E-mail: kafs08@bk.ru*

Поступила в редакцию 10.10.2022 г.

После доработки 19.10.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Рассматривается характер деформирования глинистых грунтов в различных условиях нагружения с позиций физико-химической оценки их строения. Показано, что деформационное поведение глин определяется не только величиной воздействующих на них внешних нагрузок, но, главным образом, величиной внутреннего взаимодействия между слагающими их глинистыми минеральными частицами. Характеристика деформирования глин может быть дана на основе сопоставительного анализа величины внешних напряжений, передаваемых на их структурные контакты, со значением реальной эффективной прочности и деформируемости. Такой анализ позволяет объяснить специфические особенности деформирования глинистых грунтов, противоречащие общепринятым теоретическим положениям механики грунтов, и дает возможность обоснованного прогноза их деформационного поведения в реальных условиях напряженного состояния при строительстве и эксплуатации инженерно-хозяйственных объектов и сооружений.

Ключевые слова: *структурные контакты, тип контакта, реальная эффективная прочность, реальная эффективная деформируемость*

DOI: 10.31857/S0869780922060042

ВВЕДЕНИЕ

Глинистые породы наиболее широко распространены среди других осадочных пород и наиболее часто становятся грунтами основания для фундаментов при строительстве, испытывая при этом воздействие различных нагрузок. Все это определяет необходимость изучения закономерностей деформационного поведения глинистых грунтов под действием нагрузок, причем особенно важны не только характеристики свойств глин в естественном залегании, но и прогноз их изменения в результате трансформации внутреннего строения глинистых грунтов в напряженном состоянии при строительстве и эксплуатации инженерных объектов, что и является одной из основных задач механики грунтов.

Наибольшее практическое значение для решения строительных задач имеют механические свойства грунтов: прочность и деформируемость, для определения которых в отечественной и зарубежной практике грунтоведения применяются общепринятые методики испытаний, базирующиеся на фундаментальных положениях классической механики сплошных сред — теории трения, пластичности и упругости. Прочность и де-

формируемость грунтов определяются как механические свойства материалов, и это в общем случае позволяет решать множество практических задач при проведении инженерно-геологических изысканий. Наряду с этим, за время исследований выявлено множество противоречий между теоретическими положениями и расчетами, с одной стороны, и реальным поведением глинистых грунтов под действием нагрузок — с другой, что в значительной степени связано с изменением строения грунтов в ходе проведения испытаний [1, 2, 4, 17 и др.].

Основная причина возникающих противоречий заключается в том, что с позиций современной научно-методической базы исследований глинистые грунты рассматриваются как сплошные упругие тела, а внутреннее строение глин и их реакция на действие внешних нагрузок не учитываются. В результате параметры прочности и деформируемости глинистых грунтов не имеют четкого понятийного смысла, характеризующего строение и свойства конкретного грунта, во многом их физический смысл оказывается условным, размытым, а количественные значения зависят от прилагаемых нагрузок, метода и схемы проведения испытаний и других условий.

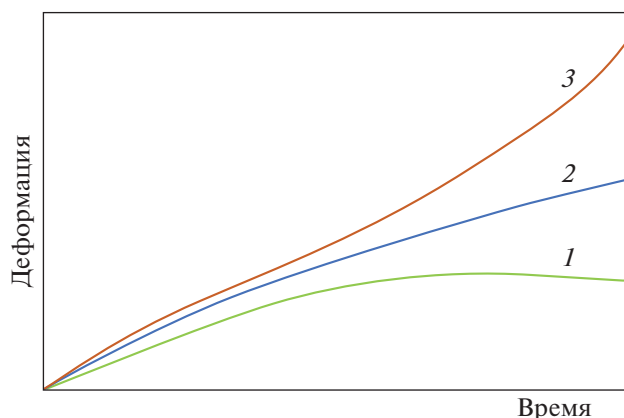


Рис. 1. Кривые ползучести в глинистых грунтах: 1 — затухающая, 2 — установившаяся, 3 — прогрессирующая.

Современная методическая база определения механических свойств глинистых грунтов позволяет определять и фиксировать существующие противоречия, но в целом вопрос об их причинах и закономерностях проявления остается дискуссионным. Все это формирует предпосылки для разработки нового научно-методического направления изучения глинистых грунтов, в котором должны рассматриваться не только величины внешних нагрузок на грунт и их соотношение, но и оцениваться внутренние напряжения, действующие в самом грунте между его компонентами. Такой подход должен основываться на современных научных представлениях об условиях образования глин, закономерностях формирования и изменения их строения и свойств [13–16].

Основная цель настоящей работы — рассмотреть особенности деформационного поведения глинистых грунтов с позиций физико-химической теории эффективных напряжений при действии внешних нагрузок и продемонстрировать результаты практического проведения таких исследований.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

В соответствии с общепринятыми теоретическими положениями механики грунтов при действии нагрузок, не превышающих уровень линейной деформируемости, в грунтах протекают упругие деформации, переходящие при увеличении нагрузки в пластические. Пластические деформации протекают при повышении нагрузки до критического уровня, при достижении которого происходит физическое разрушение грунта. Многочисленные данные экспериментальных исследований показывают, что такая теоретическая схема не всегда позволяет объективно описать деформационное поведение глинистых грунтов. Во

многих случаях деформирование глин под действием докритических нагрузок отличается от описанного, особенно при длительном действии нагрузок. В практике инженерно-геологических исследований зафиксировано множество примеров такого рода, и наиболее значимые из них — процессы ползучести и вторичной консолидации.

Ползучесть — приращение деформаций во времени при неизменной действующей нагрузке, одна из важных особенностей деформирования глинистых грунтов, которая может проявляться в них при длительном нагружении. Изучением ползучести в грунтах, впервые описанной В. Вебером (1835), занимались Н.Н. Маслов, С.С. Вялов, М.Н. Гольдштейн, Н.А. Цытович, Ю.К. Зарецкий, З.Г. Тер-Мартirosян и другие исследователи. В основе описания процесса лежат положения теории ползучести механики сплошных сред. Исследования ползучести базируются в основном на определении вязкости грунтов, скорости и интенсивности ее проявления, напряженного состояния, пороговых значений напряжений.

Ползучесть может проявляться в глинистых грунтах при действии докритических нагрузок на различных этапах сдвиговой деформации, следующих после этапа условно-мгновенной деформации. В зависимости от характера приращения деформаций выделяют разные виды ползучести (рис. 1): затухающую, установившуюся, прогрессирующую. При этом развитие затухающей ползучести происходит при меньших, чем для установившейся, напряжениях сдвига, а прогрессирующей — при больших, чем для установившейся ползучести. Наиболее активно ползучесть может проявляться в грунтах твердой, тугопластичной консистенции. В мягкопластичных и текучих грунтах ползучесть практически не проявляется.

Ползучесть глинистых грунтов имеет большое значение для определения их свойств, прогноза развития деформаций в различных условиях нагружения. Поэтому исследование этих процессов, определение природы и причин их проявления, закономерностей их протекания крайне важны при исследовании свойств глин и изменения их строения в различном напряженном состоянии.

Важной особенностью глинистых грунтов является изменение их строения, проявляющееся в процессе консолидации (уплотнения) под действием внешней нагрузки. Такие изменения могут происходить непосредственно в процессе экспериментальных испытаний грунтов, что приводит к искажениям результатов исследований. Для описания процесса было введено понятие вторичной консолидации грунта, причины и природа которой остаются в значительной степени неясной. Ряд исследователей объясняют это явление

деформацией самих твердых частиц грунта в процессе нагружения [3], но это положение противоречит данным о прочности структурных элементов глинистых грунтов М.М. Филатова [18], Е.М. Сергеева [12], В.Д. Ломтадзе [8]. Проведенные ими опытные исследования показали, что прочность частиц глинистых минералов чрезвычайно высока, и они практически не разрушаются даже под действием огромных нагрузок, превышающих возможные нагрузки от инженерных сооружений, что говорит о том, что прочность глинистых систем определяется именно прочностью структурных связей.

Современные методы исследований позволяют фиксировать изменение строения и свойств глинистых грунтов под действием нагрузок. При этом природа, причина и закономерности таких явлений остаются во многом неопределенными, что обуславливает необходимость их дальнейшего изучения на основе научных представлений о строении и природе изменения свойств глин.

В основе современных научных представлений о строении глин лежит рассмотрение их как дисперсных систем, сложенных минеральными частицами глинистых минералов дисперсной фазы и водой, слагающей дисперсионную среду. Эти представления базируются на положениях фундаментальных теорий ДЛФО (сокр. от теории Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека), двойного электрического слоя (ДЭС), теории контактных взаимодействий П.А. Ребиндера и теории расклинивающего действия Б.В. Дерягина. Эти базовые теории коллоидной и физической химии были развиты применительно к глинистым дисперсным грунтам В.И. Осиповым, В.Н. Соколовым, Н.А. Румянцевой [9–11, 13–16] и другими учеными и послужили основой физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах. Эта теория описывает структурообразование глин за счет возникновения физико-химических связей в результате действия сил притяжения и отталкивания между частицами глинистых минералов и их взаимодействия с водой в ходе литогенеза, приводящего к формированию структурных контактов между минеральными частицами.

Общая характеристика энергетического взаимодействия в дисперсных системах, разработанная в рамках теории ДЛФО, отображается зависимостью результирующей величины действия сил притяжения и отталкивания частиц дисперсной фазы от расстояния между ними. Функция энергетического взаимодействия имеет два потенциальных минимума, отвечающих наиболее устойчивому и энергетически выгодному состоянию системы, разделенных и ограниченных энергетическими максимумами. Внешние напряжения, действующие на грунт, передаются на площадки контактов и концентрируются там, а

общая прочность глинистой дисперсной системы определяется суммарной прочностью отдельных контактов. Для ее характеристики В.И. Осиповым [10] были введены понятия реальной и общей эффективной прочности. Реальная эффективная прочность характеризует силу взаимодействия между частицами и определяется как величина реального эффективного напряжения σ'' на контактах при их разрушении. Аналогично реальной эффективной прочности для глинистых грунтов может быть определена величина реальной деформируемости – максимальная величина реального эффективного напряжения σ'' на контактах, при котором глины проявляют упругие свойства в результате преобладающего действия на контактах частиц сил притяжения между ними.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ранее автором [5, 6] была разработана методика экспериментального определения величины реального эффективного напряжения в глинах и на ее основе определены характеристики реальной эффективной прочности и деформируемости (данные приведены в табл. 1) различных разновидностей глинистых грунтов.

Анализ приведенных данных показывает, что для каждого грунта, в зависимости от преобладающего типа контактных взаимодействий в нем, выделяются три уровня напряжений, при превышении их реальным эффективным напряжением происходит резкое изменение строения и свойств грунта. Это уровни реальной эффективной деформируемости, реальной эффективной прочности и прочности, определенной по закону Мора–Кулона (рис. 2).

В условиях нагружения, при которых величина реального эффективного напряжения не превышает реальную эффективную деформируемость, преобладающие силы притяжения на контактах препятствуют перемещению частиц и направлены на возвращение дисперсной глинистой системы в исходное наиболее устойчивое равновесное энергетическое состояние потенциального минимума.

При нагрузке выше уровня реальной эффективной деформируемости дисперсная глинистая система попадает в зону преобладающего действия сил отталкивания на контактах. Действие сил отталкивания способствует перемещению и переориентации частиц, сжатию и утончению их гидратных пленок, и при достижении реальным эффективным напряжением величины реальной эффективной прочности происходит разрушение контактов.

При уровне предельных нагрузок на грунт, соответствующему закону Мора–Кулона, происхо-

Таблица 1. Реальная эффективная прочность и деформируемость контактов разновидностей глинистых грунтов

Преобладающий минеральный состав глинистой фракции	Разновидность грунта по числу пластичности	В числителе – реальная эффективная прочность, в знаменателе – реальная эффективная деформируемость единичного контакта преобладающего типа, Н		
		переходного точечного	ближнего коагуляционного	дальнего коагуляционного
Сапонит	Глина тяжелая	$\frac{1.9 \times 10^{-09}}{6.4 \times 10^{-10}}$	$\frac{4.7 \times 10^{-10}}{2.1 \times 10^{-10}}$	$\frac{9.7 \times 10^{-11}}{4.6 \times 10^{-11}}$
Монтмориллонит		$\frac{1.7 \times 10^{-09}}{5.4 \times 10^{-10}}$	$\frac{4.3 \times 10^{-10}}{1.7 \times 10^{-10}}$	$\frac{7.7 \times 10^{-11}}{2.6 \times 10^{-11}}$
Каолинит, иллит	Глина легкая	$\frac{1.4 \times 10^{-09}}{4.7 \times 10^{-10}}$	$\frac{3.1 \times 10^{-10}}{1.0 \times 10^{-10}}$	$\frac{4.3 \times 10^{-11}}{1.5 \times 10^{-11}}$
	Суглинок тяжелый			
	Суглинок легкий			
	Супесь			

дит его физическое разрушение как сплошного тела.

Специфическая особенность структурных контактов дисперсных глинистых грунтов – их обратимость, т.е. способность к трансформации из одного типа в другой при определенных условиях. Возможность таких трансформаций подтверждается данными, показанными на рис. 3.

Эти данные свидетельствуют о том, что, в зависимости от содержания влаги, определяющего толщину гидратных пленок частиц и, соответственно, расстояние между частицами, в одних и тех же по составу грунтах могут формироваться контакты различного типа. В структуре глини-

стых грунтов практически всегда присутствуют контакты различного типа, поэтому, характеризуя такие грунты, необходимо говорить именно о преобладающем типе контактов, который и определяет их строение и свойства. В то же время наличие в структурном строении глин контактов разного типа позволяет объяснить несоответствие реального характера их деформирования закону перехода упругих деформаций в пластические. Как видно из данных, приведенных в табл. 1 и показанных на рис. 2, различия между величиной реальной эффективной прочности и дефор-

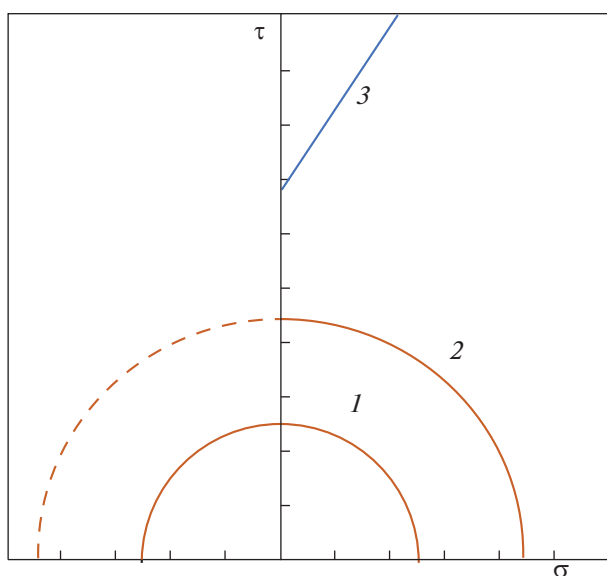


Рис. 2. Уровни напряжений в глинистых грунтах: 1 – реальная эффективная деформируемость; 2 – реальная эффективная прочность; 3 – прочность по закону Мора–Кулона.

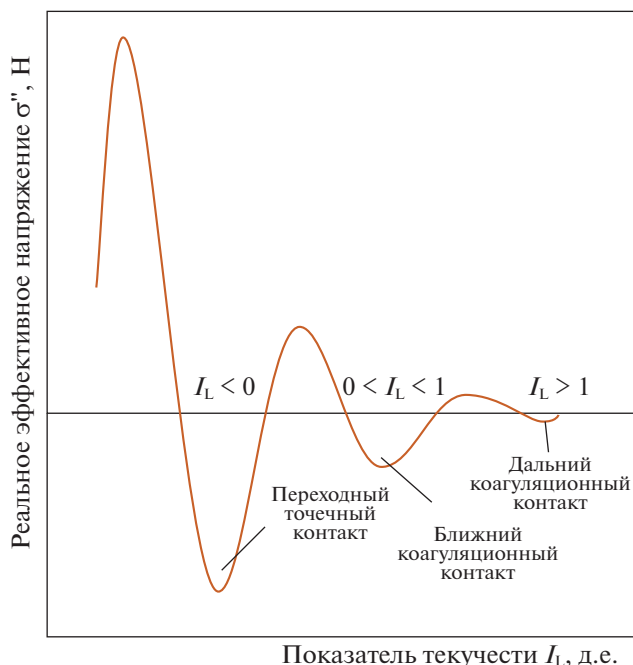


Рис. 3. Зависимость реальных эффективных напряжений в глинистых грунтах от содержания влаги.

мируемости для контактов различного типа в одних и тех же разновидностях грунтов существенны, отличаются в 10–100 раз. Эти факторы оказывают влияние на характер деформирования глин, так как одна и та же нагрузка, передаваемая на структурные контакты различного типа, может приводить к разрушению дальних коагуляционных контактов, развитию пластических деформаций на ближних коагуляционных контактах и упругих деформаций на контактах переходного типа. В определенных условиях преобладающий тип контактов для конкретного глинистого грунта может изменяться, и именно определение условий и закономерностей таких трансформаций важно для оценки свойств глин и возможностей их изменения.

Как уже было отмечено выше, реальная деформируемость глинистых грунтов при действии нагрузок не всегда может быть описана положениями теорий упругости и пластичности. Во многих случаях деформации в грунтах продолжаются даже после стабилизации (называемой условной стабилизацией), и наиболее ярко такие эффекты проявляются при длительном времени действия нагрузок. Подтверждения таких явлений наблюдаются в реальных условиях строительства и эксплуатации инженерных сооружений, когда при неизменных условиях нагружения в течение длительного времени продолжают изменяться строение и свойства глинистых грунтов оснований, вызывающие дополнительные деформации в них. В практике инженерно-геологических исследований зафиксировано множество фактических свидетельств и примеров такого рода.

Описанные положения дают общую характеристику реакции глинистых грунтов на действие внешних нагрузок, но не в полной мере позволяют охарактеризовать возможности изменения их строения и свойств при действии “промежуточных” нагрузок, величина которых находится между описанными выше уровнями напряжений.

В условиях нагружения, при которых реальные эффективные напряжения не превышают уровень реальной эффективной деформируемости, преобладающие силы притяжения между частицами препятствуют деформированию грунта и направлены на возвращение дисперсной системы в исходное равновесное энергетическое состояние. Деформация грунта в этом случае может происходить лишь при постоянном нарастании внешней нагрузки, при снятии которой грунт стремится к возвращению в первоначальное состояние, т.е. в нем протекает упругая деформация [6].

При стабилизации действия внешней нагрузки на этом уровне силы притяжения так же стремятся вернуть грунт в исходное состояние. В этом случае, в зависимости от соотношения реальной эффективной прочности грунта и величины ре-

альных эффективных напряжений (величины внешней нагрузки), возможна либо стабилизация деформаций грунта, либо развитие обратной деформации. Характерный пример такого деформирования грунта показан на рис. 4а. На приведенном графике выделяются три этапа деформирования: 1 – деформирование при увеличении внешней нагрузки, 2 – стабилизация деформации при неизменной внешней нагрузке, 3 – развитие обратной деформации. В зависимости от величины внешней нагрузки, третий этап деформирования может отсутствовать. Как видно, каждый из этапов деформирования в условиях нагружения, при которых реальные эффективные напряжения не превышают уровень реальной эффективной деформируемости, соответствует определенному виду деформаций в теории ползучести. Первый этап соответствует условно-мгновенной деформации, второй – установившейся (линия 2 на рис. 1), третий – затухающей (линия 1 на рис. 1).

При увеличении нагрузки выше реальной эффективной деформируемости в глинистой дисперсной системе преобладают силы отталкивания между частицами, действующие однонаправленно с внешними нагрузками. В этих условиях деформирование происходит как за счет влияния внешней нагрузки, так и внутренних сил взаимодействия между частицами, и при снятии или стабилизации внешней нагрузки деформирование грунта может продолжаться за счет действия последних. Характерный пример такого деформирования грунта показан на рис. 4б. На приведенном графике выделяются три этапа деформирования: 1 – деформирование при увеличении внешней нагрузки, 2 – стабилизация деформации при неизменной внешней нагрузке, 3 – дальнейшее развитие деформации. В зависимости от величины внешней нагрузки, второй этап деформирования может отсутствовать. Как видно, каждый из этапов деформирования в условиях нагружения, при которых реальные эффективные напряжения превышают уровень реальной эффективной деформируемости и ниже реальной эффективной прочности, соответствует определенному виду деформаций в теории ползучести (см. рис. 1). Первый этап соответствует условно-мгновенной деформации, второй – установившейся (линия 2 на рис. 1), третий – прогрессирующей (линия 3 на рис. 1).

При дальнейшем увеличении нагрузки и достижении реальным эффективным напряжением уровня реальной эффективной прочности происходит разрушение контактов в грунте. При этом его физическое разрушение не происходит, но преобразуется его структурное строение. При условии, когда нагрузка на грунт не превышает предела его физической прочности по Мору–Кулону, продолжающееся действие нагрузки приво-

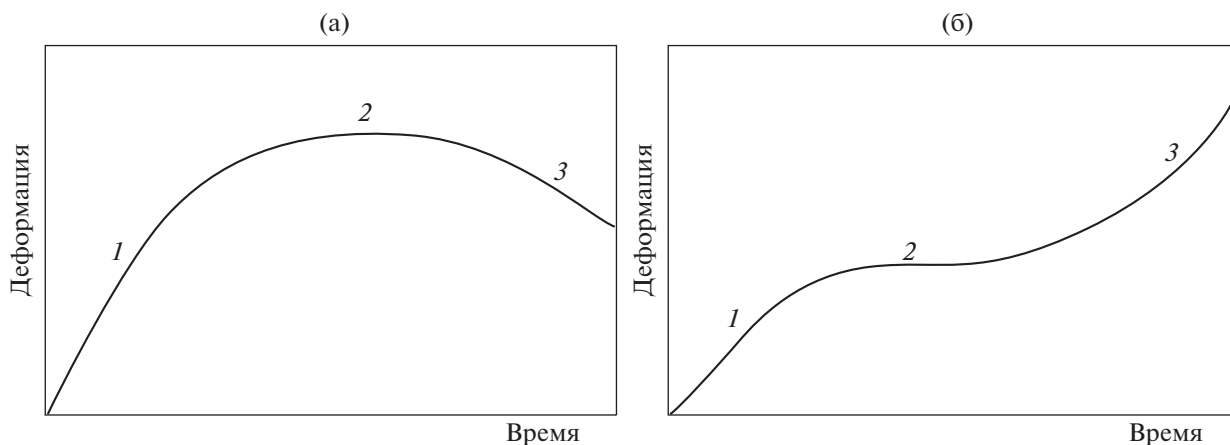


Рис. 4. Характерная деформируемость грунта при стабилизации внешней нагрузки на уровне: (а) – ниже реальной эффективной деформируемости; (б) – на уровне выше реальной эффективной деформируемости и ниже реальной эффективной прочности (пояснения в тексте).

дит к формированию новых структурных связей, и характер этих изменений зависит от условий приложения нагрузок.

Под действием сжимающих нагрузок происходит сближение частиц грунта за счет сжатия и постепенного частичного разрушения с переходом в свободную воду их гидратных пленок. В конечном итоге эти процессы способствуют образованию новых, более прочных контактов и переходу самого грунта в более твердое физико-химическое состояние.

Такой механизм трансформации контактов был подтвержден серией специальных экспериментов. Для этого к глинистым грунтам прикладывалось сжимающее давление, превышающее их реальную эффективную прочность, и велся контроль развития деформаций. Испытания проводились в одометрах, приборах недренированного сдвига и трехосного сжатия. После окончания опыта для грунтов определялись физические и механические свойства (методом чистого сдвига для определения прочностных свойств и трех-

осного сжатия по консолидировано-дренированной методике для определения деформационных свойств).

На первом этапе испытывались текучие грунты, на втором – пластичные грунты, сформировавшие на первом этапе испытаний. Результаты проведенных исследований можно продемонстрировать на примере легких глин каолинит-иллитового состава, которые приведены в табл. 2.

Величина реальной эффективной прочности и деформируемости грунтов после испытаний соответствует этим показателям, установленным для естественных грунтов соответствующего физико-химического состояния, приведенным в табл. 1.

После проведения вышеописанных испытаний были проведены исследования образцов глин методом компьютерной рентгеновской томографии (X-ray mCT) в Почвенном институте им. В.В. Докучаева РАН на рентгеновском микротомографе SkyScan 1172G. Этот метод анализа внутренней структуры объектов позволяет полу-

Таблица 2. Изменение свойств глин при действии сжимающей нагрузки

Исходный естественный грунт					Грунт после воздействия нагрузки				
Влажность, %	Плотность, г/см ³	Показатель текучести, д.е.	Реальные эффективные напряжения в единичном объеме, Н		Влажность, %	Плотность, г/см ³	Показатель текучести, д.е.	Реальные эффективные напряжения в единичном объеме, Н	
			Деформируемость	Прочность				Деформируемость	Прочность
80.5	1.51	1.01	0.007	0.06	65.0	1.61	0.56	0.12	0.34
65.0	1.61	0.56	0.12	0.34	45.0	1.76	-0.03	0.35	1.24

Таблица 3. Изменение морфометрических параметров структуры глин в результате действия сжимающих нагрузок

Морфометрический показатель	Глина твердая		Глина пластичная		Глина текучая
	естественный грунт	после испытания	естественный грунт	после испытания	естественный грунт
Объем исследуемой ячейки, мм ³	3.46				
Общая пористость, %	38.9	37.2	44.3	48.6	51.3
Средний размер пор, мм	0.0066	0.0060	0.0073	0.0078	0.0107
Объем пор в исследуемой ячейке, мм ³	0.82	0.62	1.53	1.67	1.78
Количество контактов между связанными частицами в исследуемой ячейке	962949	995264	894405	915787	287867

Таблица 4. Изменение свойств суглинков при действии ослабляющей нагрузки

Исходный естественный грунт					Грунт после воздействия нагрузки				
Влажность, %	Плотность, г/см ³	Показатель текучести, д.е.	Реальные эффективные напряжения в единичном объеме, Н		Влажность, %	Плотность, г/см ³	Показатель текучести, д.е.	Реальные эффективные напряжения в единичном объеме, Н	
			Деформируемость	Прочность				Деформируемость	Прочность
12.0	2.27	-0.08	0.24	0.90	18.2	2.13	0.56	0.05	0.19
18.0	2.13	0.54	0.05	0.19	23.0	2.04	1.05	0.003	0.05

чать их томографические проекции и рассчитывать морфометрические параметры их внутренней структуры [7]. Результаты томографических исследований, приведенные в табл. 3 и на рис. 5 и 6, показывают, что в результате действия сжимающих нагрузок исходная структура глин разрушается и формируется новая структура, характерная для грунтов с более прочными структурными связями.

Длительное действие докритических (по Морю–Кулону) нагрузок приводит к изменению структурных связей в глинах, за счет разрушения существующих и образования новых, более устойчивых. Физически это выражается в уплотнении грунтов, снижении влажности и показателя текучести, увеличении показателей прочностных и деформационных свойств. Такие изменения соответствуют результатам протекания процессов вторичной консолидации, при этом проведенные исследования позволяют понять и описать природу и причины этих явлений и закономерности их протекания.

Свойство обратимости структурных контактов глинистых грунтов (см. рис. 3) позволяет предполагать, что в определенных условиях приложения нагрузок их трансформация может протекать в обратном направлении, т.е. после разрушения под действием нагрузки могут формироваться менее устойчивые контакты. Для проверки этого теоретического положения была проведена серия специальных экспериментальных исследований. Принципиально схема проведения испытаний аналогична вышеописанной, но образцы грунта брались в исходном твердом физико-химическом состоянии, а нагружение грунта проводилось путем создания противодействия в поровой воде. Величина противодействия устанавливалась так, чтобы она превышала реальную эффективную прочность грунта, при этом грунт нагружался дополнительной нагрузкой, превышающей величину противодействия для того, чтобы предотвратить набухание или размокание грунта.

Результаты исследований можно продемонстрировать на примере испытаний образцов суглинков, эти данные приведены в табл. 4. Вели-

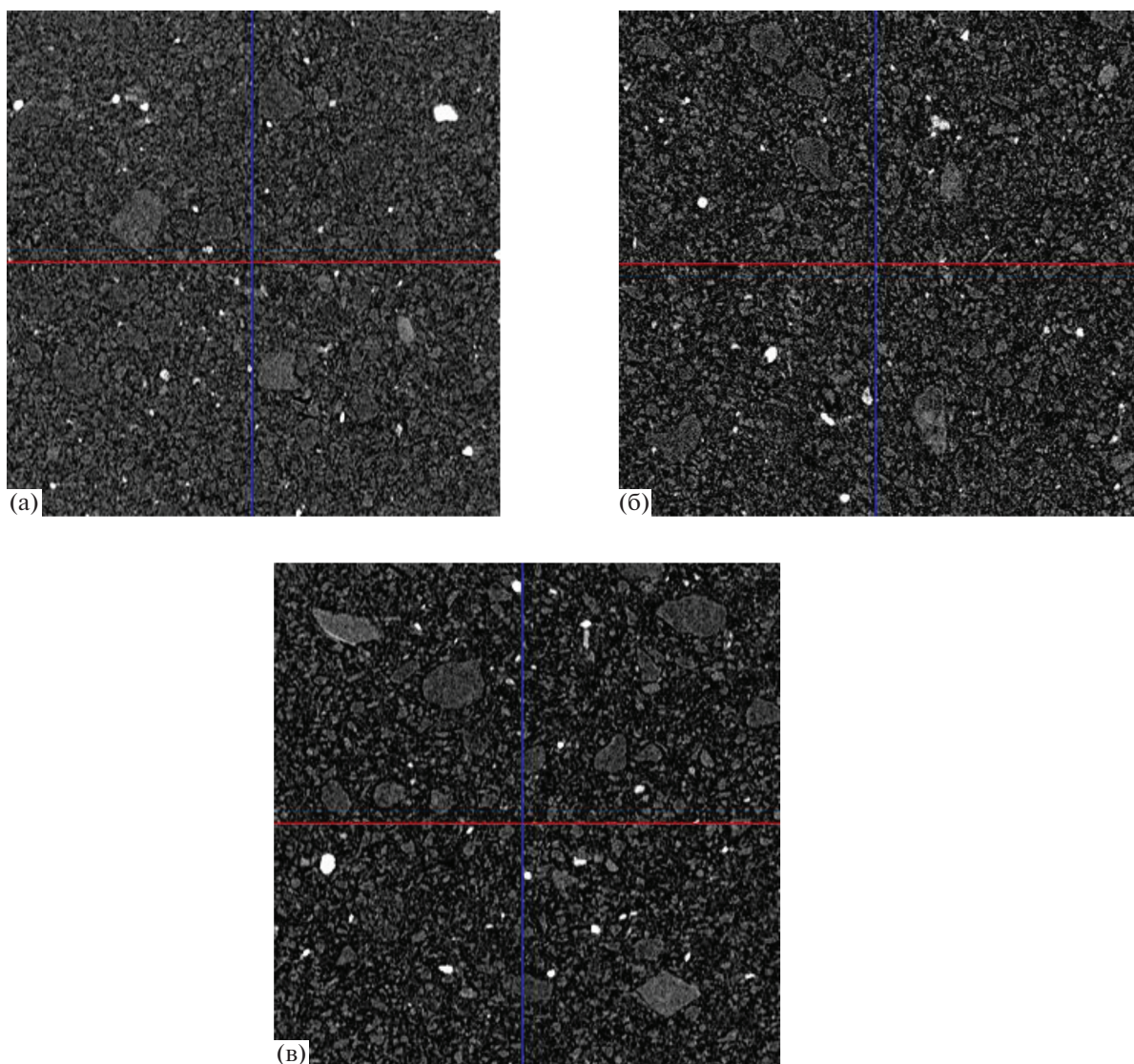


Рис. 5. Томографическая проекция структуры глин (исходный естественный грунт): (а) – твердых; (б) – пластичных, (в) – текучих.

чина реальной эффективной прочности и деформируемости грунтов после испытаний соответствует этим показателям, полученным для естественных грунтов соответствующего физико-химического состояния, приведенным в табл. 1.

В результате длительного действия противодействия, также как и в случае сжимающих нагрузок, происходит трансформация контактов, но в данном случае формируются новые, менее устойчивые контакты. Действие противодействия в поровой воде способствует увеличению расстояния между частицами грунта и увеличению толщины гидратных пленок за счет перехода части свободной воды в диффузный слой, что и приводит к изменению структурных связей в глинистых грунтах. Физически это выражается в разуплотнении грунтов, снижении их плотности,

повышении влажности и показателя текучести, ослаблении прочностных и деформационных свойств.

ВЫВОДЫ

Характер деформирования глинистых грунтов определяется не только величиной воздействующих на них внешних нагрузок, но и в значительной степени реакцией самих грунтов на действие этих нагрузок. Эта реакция вызывается изменением структурного строения глин в результате нарушения энергетического взаимодействия между слагающими их минеральными частицами.

Закономерность деформирования глинистого грунта зависит от соотношения уровня и характера внешних нагрузок и вызванных ими общих и

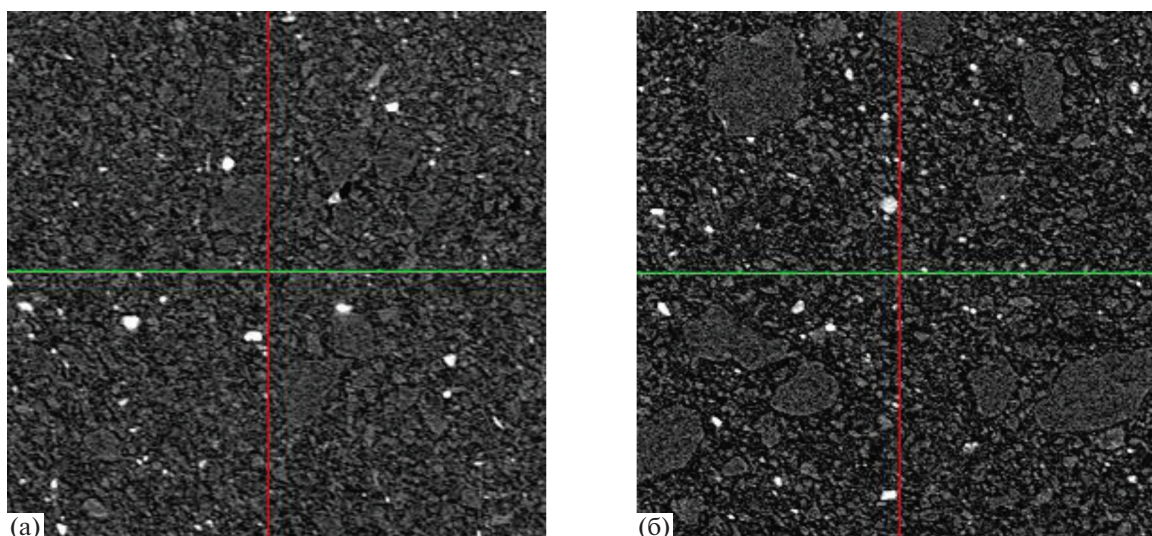


Рис. 6. Томографическая проекция структуры глин, сформированных под действием сжимающих нагрузок: (а) – твердых; (б) – пластичных.

реальных напряжений на структурных контактах и величины внутренних взаимодействий в нем – реальной эффективной прочности и деформируемости. Сопоставительный анализ этих характеристик дает возможность прогноза деформаций, которые будут протекать в глинистых грунтах в реальных условиях нагружения. Такой анализ позволяет, с одной стороны, охарактеризовать строение и свойства глинистых грунтов, с другой – дает понимание причин и закономерностей характера их деформирования, в ряде случаев противоречащий общепринятым теоретическим положениям механики грунтов. Наиболее важными среди таких противоречий являются изменение свойств глин при действии нагрузок, неоднозначный характер их деформирования, развитие либо незатухающих деформаций после их стабилизации или их затухание, либо упругих деформаций на стадии пластического деформирования и другие особенности, проявляющиеся в различных условиях действия нагрузок.

С другой стороны, предложенный подход позволит дать достоверный прогноз изменения строения и свойств глинистых грунтов в реальных условиях действия нагрузок. В этом случае использование показателей реальной эффективной прочности и деформируемости в прогнозных расчетах устойчивости и деформирования глинистых грунтов приведет к повышению их точности при осуществлении практической инженерно-хозяйственной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богданов Е.Н.* О механических свойствах глинистых грунтов // *Грунтоведение*. 2012. № 1. С. 64–71.
2. *Богданов Е.Н.* Состояние проблемы с определением физико-механических свойств грунтов // *Грунтоведение*. 2015. № 1. С. 54–67.
3. *Болдырев Г.Г., Малышев М.В.* Механика грунтов. Основания и фундаменты. Пенза: ПГУАЗ, 2009. 412 с.
4. *Вознесенский Е.А.* Пороговые деформации в грунтах // *Геотехника*. 2018. Т. X. № 5–6. С. 6–16.
5. *Карпенко Ф.С.* Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // *Геоэкология*. 2019. № 5. С. 48–60.
6. *Карпенко Ф.С.* Физико-химическая природа деформируемости глинистых грунтов // *Геоэкология*. 2020. № 6. С. 63–73.
7. *Карпенко Ф.С., Абросимов К.Н., Сереброва О.В.* Вопросы определения числа структурных контактов в глинистых дисперсных грунтах // *Геоэкология*. 2021. № 5. С. 60–71.
8. *Ломтадзе В.Д.* Изменение состава, структуры, плотности и связности глин при уплотнении их большими нагрузками // *Тр. лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР*. 1955. Т. 12.
9. *Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А.* Микроструктура глинистых пород / Под ред. Е.М. Сергеева. М.: Недра, 1989. 211 с.
10. *Осипов В.И.* Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИГЭ РАН, 2012. 74 с.
11. *Осипов В.И., Соколов В.Н.* Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
12. *Сергеев Е.М.* К вопросу о механической прочности дисперсных грунтов // *Уч. зап. МГУ*. 1949. № 10.
13. *Соколов В.Н.* Влияние влажности на прочность структурных связей глинистых частиц // *Вестник МГУ. Сер. геологическая*. 1973. № 6. С. 100–104.
14. *Соколов В.Н., Осипов В.И.* Влияние различных категорий связанной воды на прочность глин // *Свя-*

- занная вода в дисперсных системах. 1977. Вып. 4. М.: МГУ. С. 4–15.
15. Соколов В.Н. Физико-химические аспекты механического поведения глинистых грунтов // Инженерная геология. 1985. № 4. С. 18–41.
 16. Соколов В.Н. Модели микроструктур глинистых грунтов // Инженерная геология. 1991. № 6. С. 32–40.
 17. Усов А.Н., Чернов М.С., Соколов В.Н., Вознесенский Е.А. Изменение микростроения глинистых грунтов при деформировании в условиях трехосного сжатия с учетом проявления деформационной неустойчивости // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2017. № 6. С. 87–91.
 18. Филатов М.М. О микроструктуре грунтов в связи с деформациями их под влиянием нагрузки // Физика почв СССР. Тр. Сов. секции Междунар. ассоциации почвоведов. Т. 5. 1936.

THE MODE OF CLAY SOIL DEFORMATIONS FROM THE STANDPOINT OF PHYSICOCHEMICAL THEORY OF EFFECTIVE STRESSES

F. S. Karpenko^{a, #}

^a *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

[#] *E-mail: kafs08@bk.ru*

The character of deformations in clay soils under various stress conditions is considered from the standpoint of their physicochemical structure. It is shown that the deformation specificity of clays is determined not only by the external loads values but, above all, by the magnitude of internal interaction between clay-mineral particles composing them. The characteristic of clay deformation can be given on the basis of a comparative analysis of external stresses transmitted to their structural contacts with the value of real effective strength and deformability. This analysis allows us to explain the specific features of clay soil deformations that contradict the generally accepted theoretical provisions of soil mechanics and makes it possible to reasonably predict their deformation behavior under real stress conditions during the construction and operation of engineering and economic facilities and structures.

Keywords: *structural contacts, type of contact, real effective strength, real effective deformability*

REFERENCES

1. Bogdanov, E.N. *O mekhanicheskikh svoystvakh glinistykh gruntov* [About mechanical properties of clay soils]. *Gruntovedenie*, 2012, no. 1, pp. 64–71. (in Russian)
2. Bogdanov, E.N. *Sostoyanie problemy s opredeleniem fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov* [The state-of-art in determining physicochemical properties of soils]. *Gruntovedenie*, 2015, no. 1, pp. 54–67. (in Russian)
3. Boldyrev, G.G., Malyshev, M.V. *Mekhanika grunotov. Osnovaniya i fundamente* [Soil mechanics. Foundations and basements]. Penza, PGUAZ Publ., 2009, 412 p. (in Russian)
4. Voznesenskii, E.A. *Porogovye deformatsii v gruntakh* [Threshold deformations in soils]. *Geotekhnika*, 2018, vol. X, no. 5–6, pp. 6–16. (in Russian)
5. Karpenko, F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda prochnosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil strength]. *Geoekologiya*, 2019, no. 5, pp. 48–60. (in Russian)
6. Karpenko, F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda deformiruemosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil deformability]. *Geoekologiya*, 2020, no. 6, pp. 63–73. (in Russian)
7. Karpenko, F.S., Abrosimov, K.N., Serebrova, O.V. *Voprosy opredeleniya chisla strukturnykh kontaktov v glinistykh dispersnykh gruntakh* [Issues of determining the number of structural contacts in clayey dispersed soils]. *Geoekologiya*, 2021, no. 5, pp. 60–71 (in Russian).
8. Lomtadze, V.D. *Izmenenie sostava, struktury, plotnosti i svyaznosti glin pri uplotnenii ikh bol'shimi nagruzkami* [Changes in the composition, structure, density and cohesion of clays when compacted with heavy loads]. *Trudy laboratorii gidrogeologicheskikh problem AN SSSR*, 1955, vol. 12. (in Russian)
9. Osipov, V.I., Sokolov, V.N., Rummyantseva, N.A. *Mikrostruktura glinistykh porod* [Microstructure of clay rocks]. Sergeev, E.M., Ed. Moscow, Nedra Publ., 1989, 210 p. (in Russian)
10. Osipov, V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh* [Physicochemical theory of effective stresses in soils]. Moscow, IEG RAS, 2012, 74 p. (in Russian)
11. Osipov, V.I., Sokolov, V.N. *Gliny i ikh svoystva. Sostav, stroenie i formirovanie svoystv* [Clays and their properties. Composition, structure and formation of properties]. Moscow, GEOS Publ., 2013, 576 p. (in Russian)
12. Sergeev, E.M. *K voprosu o mekhanicheskoi prochnosti dispersnykh gruntov* [About the mechanical strength of fine-grained soils]. *Uch. zapiski MGU*, 1949, no. 10. (in Russian)
13. Sokolov, V.N. *Vliyanie vlazhnosti na prochnost' strukturnykh svyazei glinistykh chastits* [Moisture effect on the strength of structural connections of clay particles].

- Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geolog.*, 1973, no. 6, pp. 100–104. (in Russian).
14. Sokolov, V.N., Osipov, V.I. *Vliyaniye razlichnykh kategorii svyazannoi vody na prochnost' glin* [Influence of different categories of bound water on the strength of clays]. *Svyazannaya voda v dispersnykh sistemakh*, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1977, Vyp. 4, pp. 4–15. (in Russian)
 15. Sokolov, V.N. *Fiziko-khimicheskie aspekty mekhanicheskogo povedeniya glinistykh gruntov* [Physicochemical aspects of the mechanical behavior of clay soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 1985, no. 4, pp. 28–41. (in Russian)
 16. Sokolov, V.N. *Modeli struktur glinistykh gruntov* [Clay soil microstructure models]. *Inzhenernaya geologiya*, 1991, no. 6, pp. 32–40. (in Russian)
 17. Usov, A.N., Chernov, M.S., Sokolov, V.N., Voznesenskii, E.A. *Izmeneniye mikrostroeniya glinistykh gruntov pri deformirovaniye v usloviyakh trekhosnogo szhatiya s uchetom proyavleniya deformatsionnoi neustoichivosti* [Changes in the microstructure of clay soils during deformation under conditions of triaxial compression, taking into account the manifestation of deformation instability]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geolog.*, 2017, no. 6, pp. 87–91. (in Russian)
 18. Filatov, M.M. *O mikrostrukture gruntov v svyazi s deformatsiyami ikh pod vliyaniem nagruzki* [On the microstructure of soils in connection with their deformations under load]. *Fizika pochv SSSR. Trudy Sov. sektsii Mezhdunarodnoi assotsiatsii pochvedov.* 1936, vol. 5. (in Russian)