

DOI 10.53278/2306-9139-2023-2-21-3-12

УДК 624.131.4

СВОЙСТВА ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ С ПОЗИЦИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ

CLAYEY SOILS PROPERTIES ON THE PHYSICOCHEMICAL THEORY OF STRENGTH POSITIONS

© 2023 г. Ф. С. Карпенко

© 2023 F. S. Karpenko

Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000, Россия
Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science, Ulanskii per. 13, bld. 2,
Moscow, 101000, Russia

kafs08@bk.ru

Аннотация: С позиций физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах рассматриваются научно-методические вопросы изучения глинистых грунтов, определения их механических свойств. Показано, что именно величина сил взаимодействия между частицами глинистых грунтов определяет их строение, свойства и характер деформирования в различных условиях воздействия внешних нагрузок. Рассмотрена практическая методика изучения глинистых грунтов, позволяющая определять величину внутренних напряжений, действующих в самом грунте между его компонентами.

Abstract: scientific and methodological issues of studying clayey soils and determining their mechanical properties are considered on the standpoint of the physicochemical theory of effective stresses in soils. The modern theoretical base of research assumes estimate only the effect of external loads on the soil and their relationship but does not consider its internal structure. It is shown that the value of the forces of interaction between the particles of clayey soils determines their structure, properties, and character of the deformations under various conditions of external loads. A practical method of clayey soils studying is considered. This methodology makes it possible to determine the value of internal stresses between the mineral particles of the clayey soils.

Ключевые слова: глинистые грунты, структурные контакты, количество контактов, гидратные пленки, общие эффективные напряжения, реальные эффективные напряжения, реальная эффективная прочность, реальная эффективная деформируемость.

Keywords: clayey soils, structural contacts, number of contacts, hydrate films, total effective stresses, real effective stresses, real effective strength, real effective deformability.

Введение

Глинистые грунты наиболее широко распространены среди всех осадочных пород земной коры, чаще других используются в качестве основания и материала для строительства, что определяет важность объективного и достоверного определения их свойств при проведении инженерно-геологических изысканий, наибольшее практическое значение среди которых имеют механические свойства, прочность и деформируемость. В отечественной и зарубежной практике грунтоведения определение свойств глинистых грунтов проводится по аналогичным методикам испытаний, закрепленным ведущими нормативными документами. В основе этих общепринятых методик

положены фундаментальные положения классической механики сплошных сред — теории трения, пластичности и упругости.

В целом, прочность и деформируемость 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 теоретических положений и расчетов с реальным поведением глинистых грунтов под действием нагрузок, что в значительной степени связано с изменением их строения в ходе проведения испытаний [1–3, 17 и др.]. 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. 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 величина зависит от прилагаемых нагрузок, метода и схемы проведения испытаний и других условий.

Основная причина возникающих противоречий заключается в том, что с позиций современной научно-методической базы исследований глинистые грунты рассматриваются как сплошные упругие тела, но при этом реальное строение глин значительно более сложное. Важной особенностью глин является то, что в их составе, наряду с песчаными и пылеватыми частицами, присутствуют минеральные частицы глинистых минералов, что является важнейшим фактором, определяющим их строение и обуславливающим свойства. Глинистые частицы взаимодействуют между собой и с содержащейся в грунте водой, а под влиянием внешних воздействий, в первую очередь нагрузки, параметры этого взаимодействия могут изменяться, определяя реакцию глин их действие. Именно это в значительной степени и обуславливает возникающие при практических исследованиях глинистых грунтов противоречия. В то же время существующая в настоящее время методическая и техническая база испытаний грунтов не дает возможности определения внутренних напряжений в них и оценки их изменения в различном напряженном состоянии, поэтому этот важнейший фактор в практических исследованиях не может учитываться.

Все это формирует предпосылки для разработки нового научно-методического направления изучения глинистых грунтов, при котором должны рассматриваться не только величины внешних нагрузок на грунт и их соотношение, но и оцениваться внутренние напряжения, действующие в самом грунте между основными его компонентами, определяющими строение и свойства — частицами глинистых минералов и водой. Возможность разработки такого подхода дают современные научные представления об условиях образования глин, закономерностях формирования и изменения их строения и свойств, сформулированные в положениях физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах. Рассмотрение возможности практического проведения таких исследований является основной целью настоящей работы.

Теоретический анализ состояния вопроса

В основе современных научных представлений о строении глин лежит рассмотрение их как дисперсные системы, сложенные минеральными частицами глинистых минералов дисперсной фазы и водой, слагающей дисперсионную среду. Эти представления базируются на положениях фундаментальных теорий ДЛФО (сокращ. 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 [12–14] 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 взаимодействия с водой, приводящего к формированию структурных контактов между минеральными частицами и их трансформации в процессе литогенеза. Для дисперсных глинистых грунтов В.И. Осиповым [11] было выделено 3 основных типа структурных контактов — дальний коагуляционный, ближний коагуляционный и переходный точечный. Коагуляционные контакты возникают в тонкодисперсных водонасыщенных грунтах за счет дальнедействующих молекулярных и электростатических взаимодействий. Действующие на таких контактах силы превышают вес частиц, поэтому грунты с коагуляционными контактами ведут себя как связные системы. Характерной особенностью коагуляционных контактов является то, что частицы не взаимодействуют непосредственно между собой, между ними имеется тонкая равновесная прослойка связной воды. При дальнейшем сближении частиц может происходить прорыв гидратной пленки и образование непосредственного контакта между ними. При этом формируются контакты переходного типа, в основе которых лежат силы ионно-электростатического взаимодействия. Особенностью контактов в глинах является их метастабильность и способность переходить при определенных условиях в коагуляционные или фазовые.

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 энер-

гетического взаимодействия имеет два потенциальных минимума, отвечающих наиболее устойчивому энергетически выгодному состоянию системы и разделенных энергетическим максимумом. 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 [13] 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. Реальная эффективная прочность контактов, расклинивающее давление гидратных пленок и сжимающие капиллярные силы, действующие в неводонасыщенных грунтах, суммарно определяют общую эффективную прочность глинистого грунта — напряжение σ , при достижении которого на контактах частиц происходит разрушение структурных связей между ними.

В естественных условиях дисперсная система находится в наиболее устойчивом энергетическом положении, соответствующем условиям потенци-

ального минимума. При приложении нагрузки на структурные контакты энергетическое положение системы начинает изменяться и, в зависимости от величины нагрузки, система может оставаться в зоне преобладания сил притяжения между частицами либо перемещаться в зону преобладания сил отталкивания (рис. 1). В первом случае при снятии нагрузки силы притяжения будут стремиться вернуть систему в исходное равновесное состояние. Для дисперсных систем глинистых грунтов это соответствует условиям проявления ими упругой деформируемости и характеризует предел внешних нагрузок, при которых определяются деформационные свойства грунтов. Аналогично реальной эффективной прочности этот уровень напряжений может быть назван реальной эффективной деформируемостью.

Методика и результаты исследования

Современная приборная база грунтоведческих исследований не дает возможности непосредственного измерения напряжений на контактах глинистых грунтов. Оценка напряжений, возникающих на контактах при их разрушении, может быть дана в таком случае только расчетным путем по резуль-

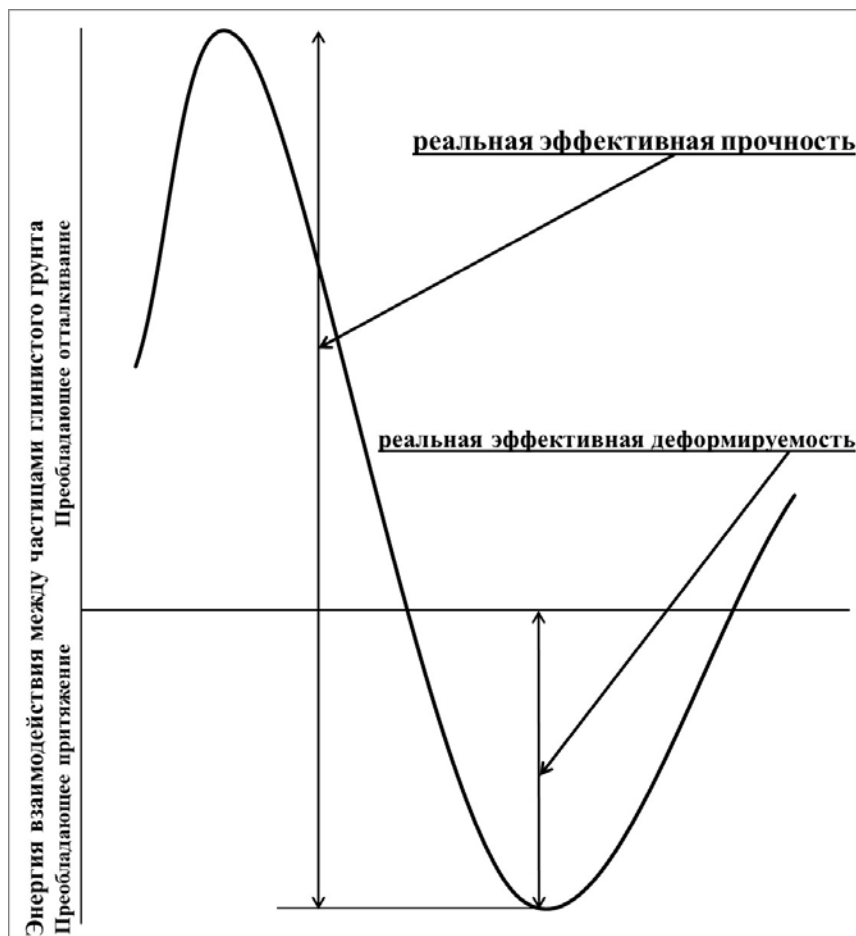


Рис. 1 — Определение реальной эффективной прочности и реальной эффективной деформируемости глин

татам определения общей эффективной прочности грунта и величины расклинивающего давления гидратных пленок.

Величина общей эффективной прочности глинистого грунта σ' может быть определена экспериментально [6] как суммарная величина внешних напряжений, действующих на грунт, за вычетом величины порового давления (по К. Терцаги) при разрушении контактов между глинистыми частицами. Результаты исследований (рис. 2), выполненных для различных разновидностей глинистых моренных грунтов Московского региона (gIIms), показывают, что значение σ' закономерно снижается в ряду тяжелые глины — легкие глины — тяжелые суглинки — легкие суглинки — супеси и также снижается по мере увеличения влаги в грунте. Важным условием испытаний являлось то, что они проводились на полностью водонасыщенных грунтах, что исключало действие в них капиллярных сил. Это свидетельствует о том, что величина общей эффективной прочности зависит от минералогического состава грунта, количества глинистых частиц, следовательно, и контактов между ними, а также толщины гидратных пленок частиц. На двух участках, соответствующих влажностям грунтов равным

пределу пластичности W_P и пределу текучести W_L , происходит резкое скачкообразное изменение величины σ' . Это показывает, что переход глинистых грунтов из текучего в пластичное и из пластичного в твердое состояние, происходящий при таких значениях влажности, имеет физико-химическую природу и обусловлен изменением преобладающего типа структурных контактов в них, а именно, дальнего коагуляционного, ближнего коагуляционного и переходного точечного.

Величина общего эффективного напряжения σ' в условиях полного водонасыщения грунта, при которых не действуют капиллярные силы, определяется как результат совместного действия сил притяжения и отталкивания между минеральными частицами (реального эффективного напряжения σ'') на контактах и расклинивающего действия гидратных пленок $P(h)$. Соответственно, для определения величины σ'' , которая и определяет собственно прочность самого контакта (его реальную эффективную прочность), из полученных значений σ' должна быть вычтена величина расклинивающего давления гидратных пленок частиц.

Расклинивающее давление гидратных пленок $P(h)$ проявляется в набухании глинистых грун-

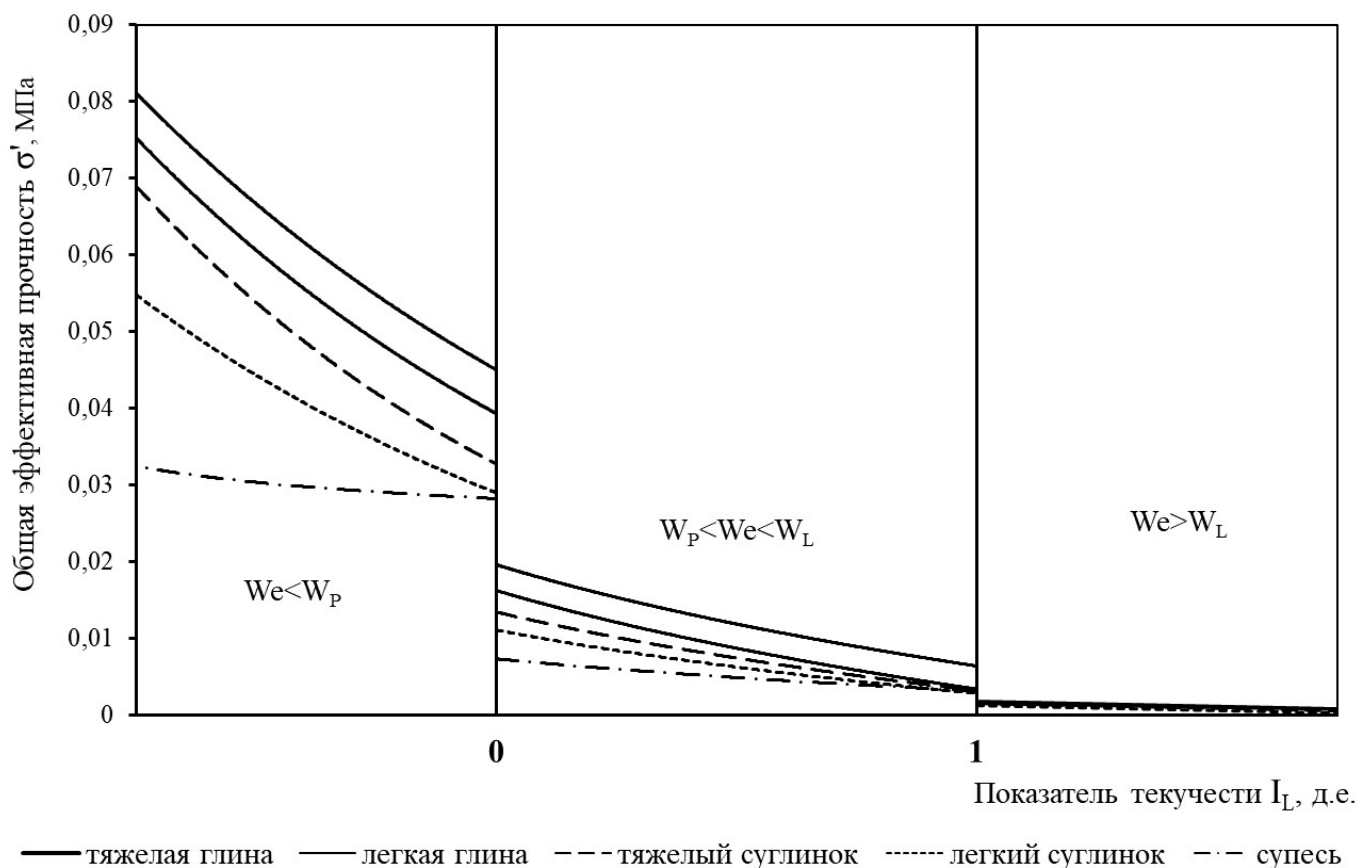


Рис. 2. Зависимость общей эффективной прочности σ' глинистых грунтов от содержания в них влаги

тов при гидратации. Развивающееся в этом случае избыточное давление одновременно воздействует на свободную воду, что приводит к повышению порового давления в грунте, и на контакты, нарушая энергетическое равновесие на них. Энергетическое равновесие на контактах в естественных условиях определяется компенсированным взаимодействием сил притяжения и отталкивания между минеральными частицами и расклинивающего действия гидратных пленок. При превышении давления гидратных пленок на контактах внешнего напряжения в грунте начинает развиваться процесс набухания. Вопрос определения величины расклинивающего действия пленок $\Pi(h)$ при набухании грунтов был рассмотрен автором с соавторами ранее [5]. Было показано, что расклинивающее давление пленок определяет величину давления набухания, и по результатам практических экспериментальных исследований были получены его численные характеристики и описаны закономерности изменения при изменении содержания влаги в грунте (рис. 3).

Закономерность изменения реальной эффективной прочности (рис. 4) и реальной эффективной деформируемости (рис. 5), определенная для раз-

новидностей глинистых моренных грунтов каолинит-иллитового и тяжелых мономинеральных глин сапонитового, монтмориллонитового и каолинитового состава, носит характер, аналогичный общей эффективной прочности [7, 8].

Полученные данные позволили, опираясь на результаты экспериментальных исследований, проведенных В.Н. Соколовым [15, 16], определить количество индивидуальных контактов (табл. 1) и величину их реальной эффективной прочности и деформируемости (табл. 2) для разновидностей глинистых грунтов [6, 7]. Эти данные были подтверждены результатами исследования образцов глин методом компьютерной рентгеновской томографии (X-ray mCT), выполненных в Почвенном институте им. В.В. Докучаева РАН на рентгеновском микротомографе SkyScan 1172G [9]. Полученные результаты, конечно, требуют своего дальнейшего изучения и уточнения, но и в данном виде могут быть применены в качестве предварительных ориентировочных при практических исследованиях строения и свойств глин.

Данные, приведенные в таблицах 1 и 2, характеризуют предельные значения реальных эффективных напряжений σ^* на контактах глинистых

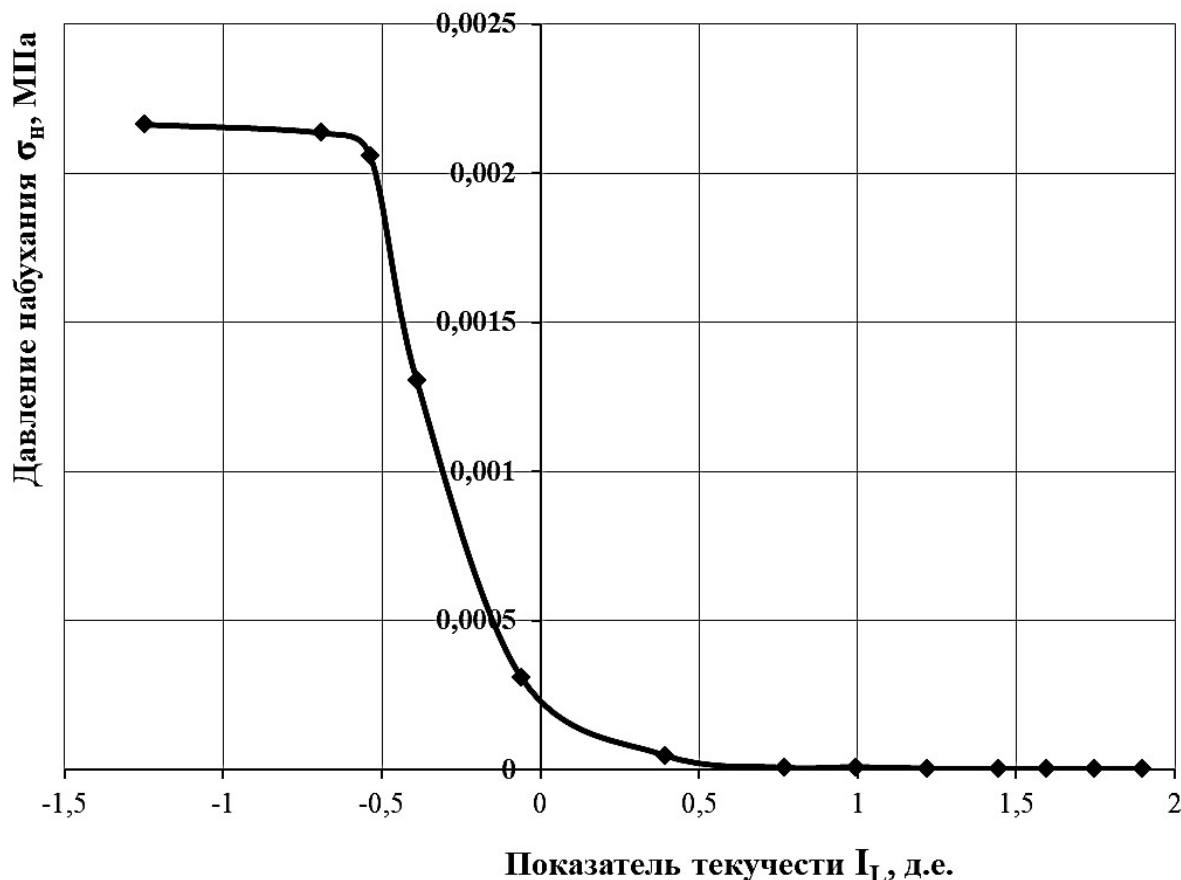


Рис. 3. Характерный график зависимости расклинивающего давления гидратных пленок в глинистых грунтах от содержания влаги

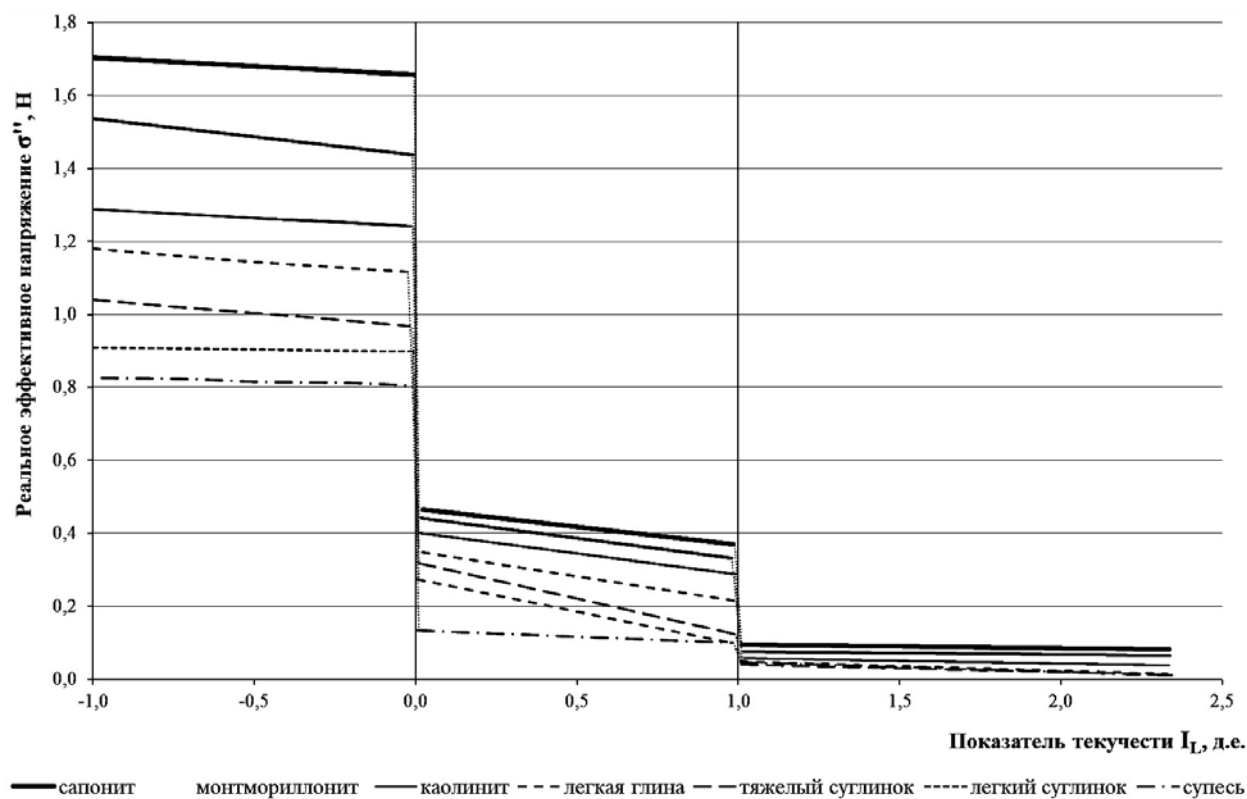


Рис. 4 — Зависимость реальной эффективной прочности (реальное эффективное напряжения σ' в единичном объеме) глинистых грунтов от содержания в них влаги

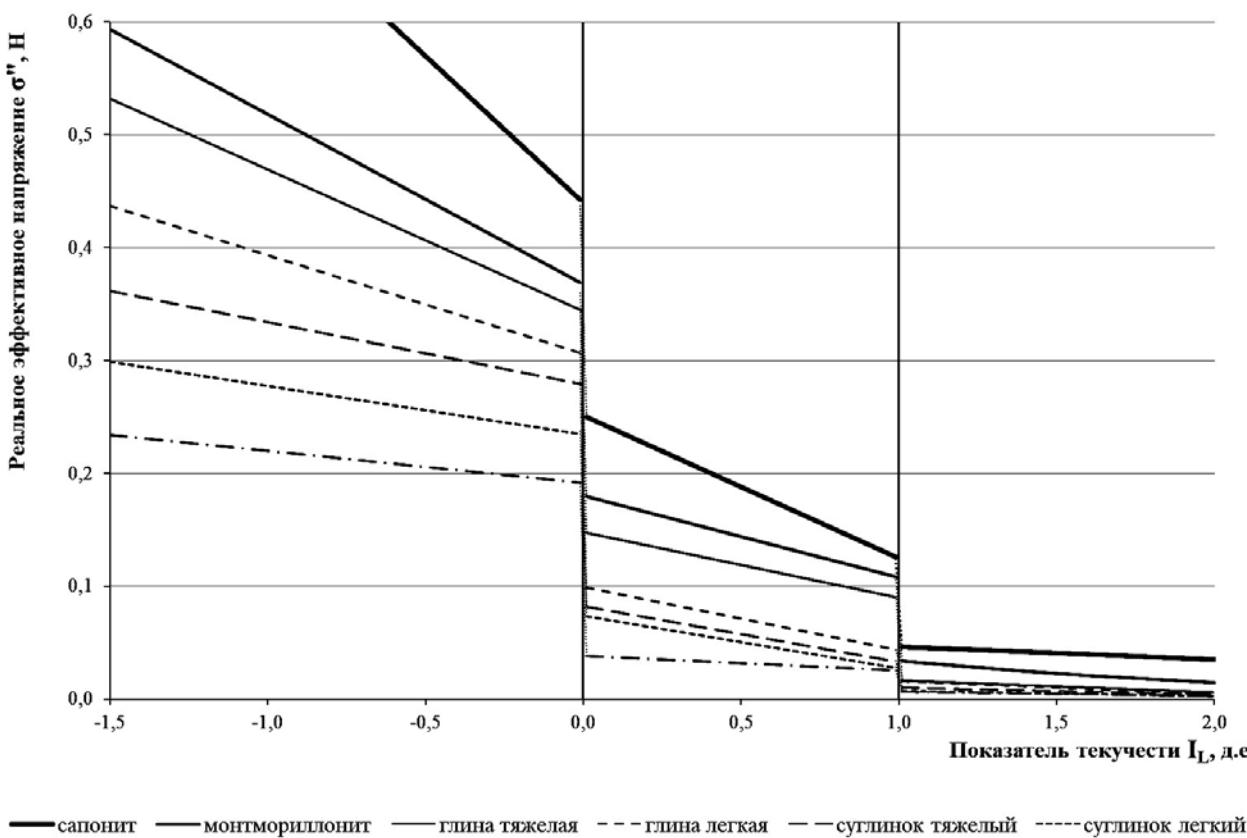


Рис. 5 — Зависимость реальной эффективной деформируемости (реальное эффективное напряжения σ' в единичном объеме) глинистых грунтов от содержания в них влаги

грунтов, определяющие их строение и характер деформирования в различных условиях напряженного состояния. Для каждой разновидности глинистого грунта, в зависимости от преобладающего типа контактных взаимодействий в нем, могут быть определены три уровня напряжений (рис. 6), при превышении реальным эффективным напряжением каждого из которых происходит резкое изменение строения и свойств грунта. Это уровень реальной эффективной деформируемости, реальной эффективной прочности и предельных напряжений по условию Мора–Кулона.

В условиях нагружения, при которых величина реального эффективного напряжения не превышает реальную эффективную деформируемость (линия 1 на рис. 6), 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 увеличении уровня внешней нагрузки выше реальной эффективной деформируемости дисперсная глинистая система перемещается в зону преобладающего действия сил отталкивания на контактах. Действие сил отталкивания способствует перемещению и переориентации частиц и при достижении реальным эффективным напря-

жением величины реальной эффективной прочности (линия 2 на рис. 6) происходит разрушение контактов.

Линия 3 на рисунке 6 соответствует величине прочности грунта, определенной в соответствии с условием Мора–Кулона, то есть уровню предельных нагрузок на грунт, при которых происходит его физическое разрушение как сплошного тела.

Приведенные данные характеризуют величины реальных эффективных напряжений в глинистых грунтах, при достижении которых внешней нагрузкой происходит резкое изменение энергетического баланса сил взаимодействия на контактах и, следовательно, строения и свойств грунтов. Такие изменения не происходят скачкообразно, поэтому для достоверной оценки описанных изменений необходимо рассматривать процессы, происходящие в глинах при действии «промежуточных» нагрузок, величина которых находится между граничными уровнями напряжений.

В условиях нагружения, при которых величина внешнего напряжения не превышает уровень реальной эффективной деформируемости глинистого грунта, 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

Таблица 1. Число контактов различного типа в разновидностях глинистых грунтов

Разновидность грунта по числу пластичности	Число контактов в элементарном объеме грунта (1 см ³) с преобладающим типом контактов		
	переходным точечным	ближним коагуляционным	дальним коагуляционным
глина тяжелая	$3,0 \cdot 10^{08} - 3,2 \cdot 10^{08}$	$2,7 \cdot 10^{08} - 3,0 \cdot 10^{08}$	$2,4 \cdot 10^{08} - 2,6 \cdot 10^{08}$
глина легкая	$2,7 \cdot 10^{08} - 2,9 \cdot 10^{08}$	$2,5 \cdot 10^{08} - 2,7 \cdot 10^{08}$	$2,2 \cdot 10^{08} - 2,4 \cdot 10^{08}$
суглинок тяжелый	$2,4 \cdot 10^{08} - 2,7 \cdot 10^{08}$	$2,2 \cdot 10^{08} - 2,5 \cdot 10^{08}$	$1,9 \cdot 10^{08} - 2,2 \cdot 10^{08}$
суглинок легкий	$2,1 \cdot 10^{08} - 2,5 \cdot 10^{08}$	$1,9 \cdot 10^{08} - 2,3 \cdot 10^{08}$	$1,7 \cdot 10^{08} - 2,0 \cdot 10^{08}$
супесь	$1,9 \cdot 10^{08} - 2,1 \cdot 10^{08}$	$1,7 \cdot 10^{08} - 2,0 \cdot 10^{08}$	$1,5 \cdot 10^{08} - 1,7 \cdot 10^{08}$

Таблица 2. 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	$\frac{1,9 \cdot 10^{-09}}{6,4 \cdot 10^{-10}}$	$\frac{4,7 \cdot 10^{-10}}{2,1 \cdot 10^{-10}}$	$\frac{9,7 \cdot 10^{-11}}{4,6 \cdot 10^{-11}}$
монтмориллонит		$\frac{1,7 \cdot 10^{-09}}{5,4 \cdot 10^{-10}}$	$\frac{4,3 \cdot 10^{-10}}{1,7 \cdot 10^{-10}}$	$\frac{7,7 \cdot 10^{-11}}{2,6 \cdot 10^{-11}}$
каолинит, иллит	глина легкая	$\frac{1,4 \cdot 10^{-09}}{4,7 \cdot 10^{-10}}$	$\frac{3,1 \cdot 10^{-10}}{1,0 \cdot 10^{-10}}$	$\frac{4,3 \cdot 10^{-11}}{1,5 \cdot 10^{-11}}$
	суглинок тяжелый			
	суглинок легкий			
	супесь			

происходить лишь при постоянном нарастании внешней нагрузки, при снятии которой грунт стремится к возвращению в первоначальное состояние, то есть в нем протекает упругая деформация. При стабилизации действия внешней нагрузки на этом уровне силы притяжения также стремятся вернуть грунт в исходное состояние. В этом случае, в зависимости от соотношения реальной эффективной прочности грунта и величины реальных эффективных напряжений (т.е. величины внешней нагрузки), возможна либо стабилизация деформаций, либо ее уменьшение, что соответствует условиям проявления установившейся и затухающей ползучести грунта.

При увеличении уровня внешней нагрузки выше реальной эффективной деформируемости

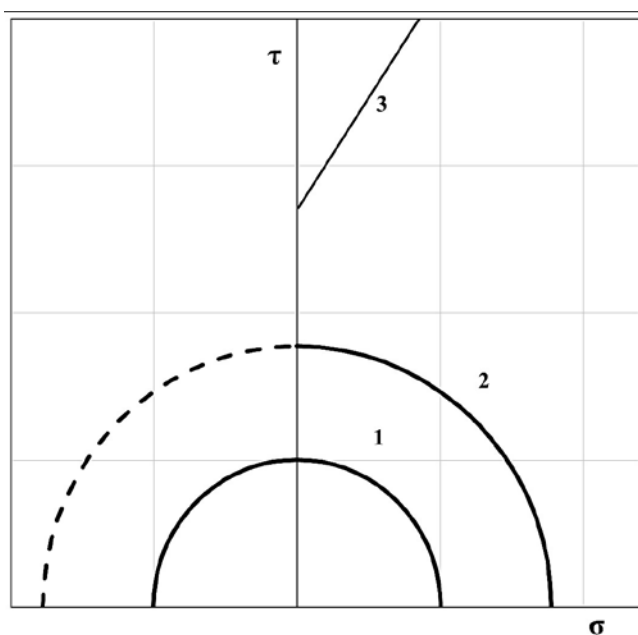


Рис. 6 — Уровень напряжений в глинистых грунтах: 1 — реальная эффективная деформируемость; 2 — реальная эффективная прочность; 3 — предельное напряжение по закону Мора-Кулона

в глинистой дисперсной системе начинают преобладать силы отталкивания между частицами, действующие однонаправленно с внешней нагрузкой. В этих условиях деформирование происходит за счет совместного влияния внешней нагрузки и внутренних сил взаимодействия между частицами, и при снятии или стабилизации внешней нагрузки деформирование грунта может продолжаться за счет действия последних, что приводит к развитию прогрессирующей ползучести. При дальнейшем увеличении величины нагрузок и достижении реальным эффективным напряжением уровня реальной эффективной прочности происходит разрушение контактов в грунте.

Важной особенностью структурных контактов дисперсных глинистых грунтов является обратимость [11], то есть возможность их трансформации из одного типа в другой в определенных условиях. Преобладающий тип контакта определяет строение и свойства глинистых грунтов, поэтому определение условий и закономерностей таких трансформаций является важным для оценки свойств глин и возможностей их изменения. При условии, что нагрузка на грунт не превышает его физической прочности по Мору-Кулону, продолжающееся действие нагрузок приводит к формированию новых структурных связей и характер этих изменений зависит от условий приложения нагрузок. Эти положения, по своей сути с позиций напряжений на структурных контактах глинистых минеральных частиц, соответствуют условиям максимальной нагрузки, при которой возможно определять прочность грунта, теории естественной прочности И.П. Иванова [4]. В соответствии с ней собственная реакция глинистого грунта на внешние воздействия имеет место в определенном индивидуальном интервале нагрузок, зависящем от его влажностного состояния.

Под действием сжимающих нагрузок происходит сближение частиц грунта и, в конечном итоге, образование новых более прочных контактов, а также переход самого грунта в более устойчивое физико-химическое состояние, из текучего в пластичное и, далее, в твердое, что выражается в уплотнении грунта, увеличении плотности, снижении влажности и показателя текучести, усилении прочностных и деформационных свойств (табл. 3).

В условиях приложения нагрузок, направленных на отдаление друг от друга частиц грунта, увеличение расстояния между ними, увеличение толщины гидратных пленок, трансформация контактов может протекать в обратном направлении: после разрушения под действием нагрузки будут формироваться менее устойчивые контакты. Таким условиям воздействия отвечает противодействие, приводящее к разуплотнению грунта, снижению его плотности, повышению влажности и показателя текучести, ослаблению прочностных и деформационных свойств (табл. 4).

Приведенные выше данные, полученные на основании выполненных экспериментальных исследований, были также подтверждены результатами компьютерной рентгеновской томографии, позволяющей получать томографические проекции глинистых грунтов и рассчитывать морфометрические параметры их внутренней структуры [10].

Таблица 3. Изменение свойств глинистого грунта 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 4. Изменение свойств глинистого грунта при действии противодавления

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	0,54	0,05	0,19
18,0	2,13	0,54	0,05	0,19	23,0	2,04	1,05	0,003	0,05

Выводы

Глинистые грунты проявляют ряд специфических свойств, отличающих их от других грунтов, и характер их деформирования под действием внешних нагрузок во многих случаях противоречит теоретическим положениям механики грунтов. В значительной степени это связано со строением глин, важнейшую роль в котором играют входящие в их состав частицы глинистых минералов, взаимодействующие между собой и с водой в грунте и образующие дисперсную систему, дисперсная фаза которой складывается из глинистых частиц, а дисперсионная среда — вязкой водой, формирующей гидратные пленки частиц.

Дисперсные глинистые системы являются чувствительными системами, в которых внешнее воздействие вызывает закономерную ответную реакцию, выражающуюся в изменении их строения и свойств, обусловленном нарушением баланса энергии взаимодействия частиц. Характер таких изменений определяется как внешними факторами: видом напряженного состояния, интенсивностью и видом нагрузок, так и внутренними — преобладающим типом контактов минеральных частиц, их количе-

ством и минеральным составом, толщиной гидратных пленок частиц и другими. Определение и прогноз изменения строения и, как следствие, свойств глинистых грунтов в различном напряженном состоянии возможно при определении их общей и реальной эффективной прочности и деформируемости, а также уровня общих и реальных напряжений на структурных контактах.

Описанный подход к определению свойств глинистых грунтов, основанный на положениях физико-химической теории реальных эффективных напряжений, определяет направление и основные принципы их исследования. Рассмотренные принципы исследований позволяют не только охарактеризовать строение и свойства глинистых грунтов, но и обосновать прогноз их изменения в результате различных воздействий, основанный на оценке реакции грунта на такие воздействия. Использование показателей реальной эффективной прочности и деформируемости в прогнозных расчетах приведет к повышению точности расчетов устойчивости и деформирования глинистых грунтов в реальных условиях нагружения при осуществлении 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. Вознесенский Е. А. Пороговые деформации в грунтах. // Геотехника, 2018, т. X, № 5–6, С. 6–16.
4. Иванов И. П. Определение показателей сопротивления сдвигу грунтов характеризующих их естественную прочность. // Вестник ЛГУ, 1975, №6, С. 73–79.

5. Карпенко Ф. С., Кутергин В. Н., Кальбергенов Р. Г. Влияние расклинивающего действия гидратных пленок на прочностные свойства глинистых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2018, № 4, С. 91–97.
6. Карпенко Ф. С. Физико-химическая природа пределов пластичности глинистых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2018, № 5, С. 66–72.
7. Карпенко Ф. С. Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2019, № 5, С. 48–60.
8. Карпенко Ф. С. Физико-химическая природа деформируемости глинистых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2020, № 6, С. 63–73.
9. Карпенко Ф. С., Абросимов К. Н., Сереброва О. В. Вопросы определения числа структурных контактов в глинистых дисперсных грунтах // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2021. № 5. С. 60–71.
10. Карпенко Ф. С. Характер деформирования глинистых грунтов с позиций физико-химической теории эффективных напряжений // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2022. № 6. С. 66–75.
11. Осипов В. И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
12. Осипов В. И., Соколов В. Н., Румянцева Н. А. Микроструктура глинистых пород / Под ред. Е. М. Сергеева. М.: Недра, 1989, 210 с.
13. Осипов В. И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИГЭ РАН, 2012, 74 с.
14. Осипов В. И., Соколов В. Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013, 576 с.
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.