

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.4

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

© 2020 г. Ф. С. Карпенко

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

E-mail: kafs08@bk.ru

Поступила в редакцию 5.06.2020 г.

После доработки 17.06.2020 г.

Принята к публикации 17.06.2020 г.

Рассматриваются научно-методические вопросы определения деформационных свойств глинистых грунтов. Показано, что противоречия результатов экспериментальных исследований и расчетов с реальным поведением грунтов под действием нагрузок не могут быть в полной мере объяснены положениями традиционной механики грунтов. Причина этого заключается в том, что современная теоретическая база исследований не рассматривает особенности внутреннего строения глин. Строение глинистых грунтов и их деформируемость рассматриваются с позиций физико-химической теории реальных эффективных напряжений в грунтах. Это позволило разработать новый подход к пониманию сущности и определению деформационных свойств дисперсных систем глинистых грунтов. В соответствии с положениями теории проведены экспериментальные исследования с целью определения реальной эффективной деформируемости глинистых грунтов. На основе полученных результатов дана ее характеристика для грунтов, в строении которых преобладают контакты различного типа. Рассмотрена взаимосвязь реальной эффективной деформируемости глинистых грунтов с традиционными показателями деформационных свойств, определяемыми в практике инженерно-геологических исследований.

Ключевые слова: деформируемость, структурные контакты, тип контакта, количество контактов, потенциальный минимум, реальные эффективные напряжения, реальная эффективная деформируемость

DOI: 10.31857/S0869780920060041

ВВЕДЕНИЕ

Деформируемость — одно из наиболее важных свойств грунтов, имеющих практическое, прикладное значение. Показатели деформационных свойств, характеризующие сжимаемость грунтов при действии на них докритических нагрузок, не приводящих к разрушению, используются в проектных расчетах осадок при строительстве и эксплуатации сооружений, что определяет важность достоверной и полной их оценки при инженерно-геологических исследованиях и требования к точности и объективности их измерений.

Для определения деформационных свойств грунтов сформирована научно-методическая база, которая практически неизменно используется в течение многих десятилетий. Методы определения деформационных свойств применяются повсеместно в практике грунтоведческих лабораторий в России и за рубежом. Однако не во всех случаях результаты исследований позволяют дать полную и достоверную характеристику деформируемости изучаемых грунтов. В наибольшей сте-

пени это проявляется при исследованиях глинистых грунтов.

Методы практического определения деформационных свойств грунтов в лабораторных условиях в настоящее время определяются положениями нормативных документов, принятых в России и других странах¹. Положения российских и зарубежных стандартов базируются на одних и тех же научно-теоретических представлениях и в целом соответствуют друг другу [6].

В настоящее время накоплены многочисленные свидетельства несоответствия результатов практических испытаний и основанных на их результатах расчетных показателей с реальными

¹ ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2011. 96 с.

BS 1377-2:1990 Methods of Test for civil engineering purposes — Part 2. Classification tests. British Standards Institution (BSI). 01.01.2010. 72 p.

ASTM D 2850-03a Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003. 6 p.

осадками глинистых грунтов оснований. Наряду с этим, в общепринятых традиционных представлениях о деформируемости глин заключены определенные условные моменты и внутренние противоречия, которые в рамках принятой теории не имеют своего объяснения.

Все эти факторы создают предпосылки для разработки и практического применения нового направления изучения деформируемости глинистых грунтов, базирующегося на современных научных представлениях об их строении, природе формирования, проявлении и изменении свойств. Такой подход может быть сформирован только в результате анализа общепринятых в настоящее время теоретических представлений и современных данных о строении и свойствах глинистых грунтов и проведении на основе этого анализа инструментальных исследований деформируемости глинистых грунтов.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Современные теоретические представления о деформационных свойствах грунтов и методы их определения базируются на положениях теории упругости общей механики сплошных сред. В основе этих положений лежит закон Гука (R. Hooke), в соответствии с которым деформации (ϵ), возникающие в твердом теле, прямо пропорциональны силе (σ), вызывающей эту деформацию: $\sigma = E \cdot \epsilon$. Применительно к грунтам коэффициент пропорциональности E носит название модуля деформации и является основной характеристикой их деформационных свойств.

Деформационные свойства характеризуют поведение грунтов под нагрузками, не превышающими критические, и, следовательно, не приводящими к разрушению грунта. Возникающие в грунте деформации могут носить как обратимый, свойственный упругим телам, так и необратимый характер, связанный с уплотнением грунта за счет уменьшения его пористости (консолидации) и перестройки минерального скелета. В определенном диапазоне нагрузок зависимость “деформация—напряжение” — линейная функция, что является основным условием применимости закона Гука к грунтам. Это условие было описано Н.М. Герсевановым, Н.А. Цытовичем [14] и сформулировано как принцип линейной деформируемости, что выражается в прямо пропорциональной зависимости деформации грунта от напряжений на начальном этапе нагружения.

Определение деформационных свойств грунтов в соответствии с ГОСТ 12248 проводится в условиях трехосного и компрессионного сжатия. Основные параметры, определяемые для характеристики деформационных свойств грунтов, — модуль общей деформации E_0 , модуль упругой

деформации E_y , коэффициент поперечной деформации (Пуассона) μ и коэффициент сжимаемости m_0 .

Испытания в условиях компрессионного сжатия в настоящее время наиболее широко распространены в отечественной практике лабораторных работ при инженерно-геологических изысканиях. В нормативных документах других стран определение деформационных свойств грунтов в условиях компрессионного сжатия не проводится. Такие испытания имеют внутренние научно-методические недостатки и противоречия, приводящие к существенным искажениям и неопределенности получаемых результатов, что ранее уже было неоднократно рассмотрено многими исследователями [6, 16]. В связи с этим результаты определений деформационных свойств грунтов при компрессионном сжатии в настоящей работе не рассматривались.

Трехосные испытания при исследовании деформационных свойств проводятся по консолидировано-дренированной схеме. В ходе испытания измеряются нагрузки на грунт и вызванные ими объемные и осевые деформации. Нагрузки могут передаваться как с постоянной скоростью, так и ступенчато. Определение деформационных свойств проводится по соотношению нагрузок и вызванных ими деформаций в области их прямо пропорциональной зависимости, что контролируется линейным характером графика при проведении опыта.

Теория упругости — одна из основных теорий фундаментальной теоретической базы современной механики грунтов. В соответствии с ее положениями создана и продолжает развиваться приборно-методическая база определения деформационных свойств грунтов в инженерно-геологических исследованиях во всем мире. Устоявшаяся практика позволяет успешно решать множество практических задач, стоящих перед инженерно-геологическими изысканиями. Наряду с этим, за все время исследований накопились определенные противоречия теоретических положений и расчетов с реальным поведением грунтов под действием нагрузок. Особенно сильно они начинают проявляться в современных условиях строительства, отличающихся возрастающими нагрузками на грунты основания, их сложным сочетанием и длительностью воздействия. В первую очередь это касается глинистых грунтов, для которых эти противоречия проявляются наиболее остро.

Основной критерий проведения испытаний грунтов на деформируемость — линейная функция деформируемости. Испытания проводятся с медленной скоростью, чтобы исключить влияние порового давления в грунте. В этих условиях грунт по теоретическим положениям деформируется как упругое тело, а параметры деформируе-

мости (модуль деформации E_0) не зависят от величины приложенных нагрузок. Результаты практических испытаний связных грунтов показывают, что их реальная деформируемость не соответствует этому положению.

Параметры деформационных свойств глинистых грунтов зависят от величины нагрузок, при которых проводятся испытания. Этот фактор описывается многими исследователями и может быть проиллюстрирован результатами определения модуля деформации глинистых грунтов, представленными на рис. 1. Исследования проводились на твердых и полутвердых перигляциальных суглинках среднечетвертичного возраста Волго-Сусканского плато одного и того же состава, обладающих близкими физическими свойствами и слагающими единый инженерно-геологический элемент.

Приведенные результаты исследований показывают, что величина модуля деформации, определенного в условиях трехосного сжатия по консолидировано-дренированной схеме нагружения, зависит от объемного давления, при котором проводятся испытания, и закономерно возрастает при увеличении последнего. Такая закономерность характерна для глинистых грунтов и не может быть объяснена в рамках теории упругости. Для учета ее влияния на проектные расчеты деформаций грунтов исследования проводятся в заданных интервалах нагрузок, соответствующих условиям строительства, однако в полной мере это не позволяет решить проблему несовпадения теоретических представлений и реальных результатов.

Несоответствие характера деформируемости глинистых грунтов закону линейной упругости проявляется также при снятии нагрузки. Упругое тело под действием сжимающей нагрузки деформируется. Эта деформация имеет обратимый характер, и после снятия нагрузки тело возвращается в исходное состояние. В условиях линейной деформируемости грунт, согласно теоретическим положениям, проявляет себя как упругое тело и должен деформироваться в соответствии с описанным принципом. При деформационных испытаниях связных грунтов это условие не выполняется. После снятия сжимающей нагрузки глины в исходное состояние не возвращаются, и в них всегда сохраняются остаточное напряжение и деформация. Для численной характеристики описанного явления было разработано и введено в практику понятие модуля упругой деформации. Величина модуля упругой деформации определяется на основе значений остаточного напряжения и деформации, но причины проявления таких свойств глин остаются необъясненными.

Наряду с рассмотренными, также как и с другими, менее существенными и яркими противо-

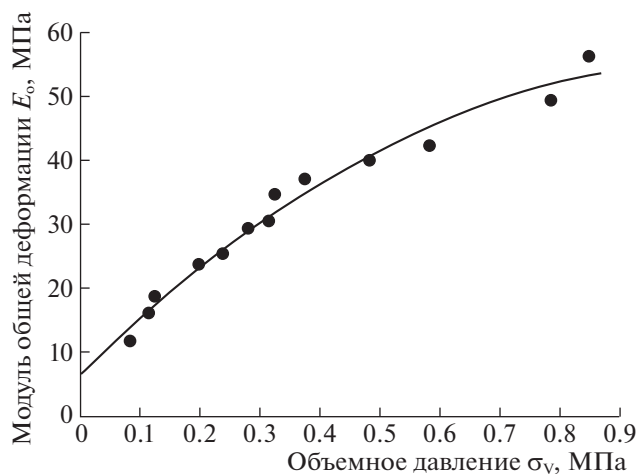


Рис. 1. Зависимость величины модуля деформации связных грунтов от объемного давления.

речиями, при применении теории упругости для исследования деформируемости связных грунтов проявляется принципиальная проблема, в целом присущая этой теории. Она заключается в том, что показатели деформируемости в принципе не могут быть установлены как постоянные величины, характеризующие свойства конкретного грунта. В зависимости от схем, по которым происходит испытание грунта, определяют: общий модуль деформации, одометрический или компрессионный модуль деформации, прессиометрический модуль, штамповый модуль, модуль упругости, модуль деформации в различных интервалах сжимающих нагрузок и др.

Основная причина несоответствий, имеющих место при применении теории упругости к дисперсным грунтам, заключается в том, что в теории, разработанной для сплошных тел, не принимается во внимание внутреннее строение грунтов. Соответственно, она не позволяет учитывать реакцию грунтов, а именно изменение их внутреннего строения, на действие внешних нагрузок. Таким образом, применение этих теоретических представлений не позволяет дать полную объективную оценку свойств глинистых грунтов, строение и свойства которых определяются действием большего количества факторов.

Все это ставит перед исследованиями деформационных свойств грунтов ряд вопросов, ответы на которые действующая теоретическая база дать не может. В настоящее время возникают условия для разработки и практического применения нового подхода к определению деформируемости глинистых грунтов, основанного на современных научных представлениях об их строении и природе формирования, проявлении и изменении свойств.

В основе современных научных представлений о строении глин лежит рассмотрение их как дисперсных систем, сложенных минеральными частицами глинистых минералов дисперсной фазы и водой, являющейся дисперсионной средой. Эти представления базируются на фундаментальных положениях теории ДЛФО (сокр. от теории Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека — теория агрегативной устойчивости лиофобных дисперсных систем), двойного электрического слоя (ДЭС), теории контактных взаимодействий П.А. Ребиндера [9–13, 15], теории расклинивающего действия Б.В. Дерягина [1–3] и обобщающей их физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах, разработанной В.И. Осиповым [7], В.И. Осиповым и В.Н. Соколовым [8] в отношении глинистых пород.

Формирование микроструктуры глин происходит в результате взаимодействия сил притяжения и отталкивания между частицами и взаимодействием с водой в ходе литогенеза, при этом вода не только заполняет поровое пространство глинистых грунтов, но и образует гидратный слой вокруг частиц, оказывая влияние на баланс сил взаимодействия частиц дисперсной фазы.

В результате такого взаимодействия происходит образование структурных контактов между минеральными частицами. В дисперсных глинистых грунтах различаются три типа контактов — дальний коагуляционный, ближний коагуляционный и переходный точечный, каждый из которых формируется на определенной стадии литогенеза. Преобладание определенного типа контактов в структуре глинистых пород определяет их физико-химическое состояние (соответственно текучее, пластичное или твердое), строение и свойства.

Площадки контактов являются локальными участками, на которых концентрируются напряжения, передаваемые на грунт. Каждый тип контактов имеет предельную прочность, определяемую силой взаимодействия между частицами и расклинивающим действием гидратных пленок, — реальную эффективную прочностью (σ''). Величина σ'' зависит от общего эффективного давления в грунте σ' , количества и площади контактов и расклинивающего действия гидратных пленок P_h . Прочность контакта зависит от минералогического состава частиц и толщины гидратной пленки на поверхности частиц и ее свойств. В условиях, при которых напряжение, передаваемое на площадку контакта, превышает его прочность, происходит разрушение последнего. Соответственно, общая реальная эффективная прочность глины определяется суммарной прочностью отдельных контактов. Более детально эти аспекты были описаны автором ранее при рассмотрении прочностных свойств глинистых грунтов [5].

Деформационные свойства глинистых грунтов имеют ту же физико-химическую природу, что и прочностные, и характеризуются величиной реальных эффективных напряжений на контактах. Соответственно, они должны рассматриваться с тех же позиций, что и прочностные свойства. Пределы напряжений, при которых в грунтах проявляются деформационные свойства, могут быть оценены на основе общих закономерностей взаимодействия сил притяжения и отталкивания частиц в дисперсных системах. 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 (рис. 2). Силы притяжения имеют отрицательные значения, а отталкивания — положительные. Функция энергетического взаимодействия (1) имеет два потенциальных минимума (2 — дальний, и 3 — ближний), также называемых энергетическими ямами, разделенных (4) и ограниченных (5) энергетическими максимумами или барьерами. Потенциальные минимумы отвечают наиболее устойчивому и энергетически выгодному состоянию системы.

В естественных условиях дисперсная система находится в наиболее устойчивом положении, соответствующем условиям энергетического минимума. При приложении нагрузки на структурные контакты энергетическое положение системы начинает смещаться по траектории, описываемой кривой энергетического взаимодействия 1, в сторону уменьшения расстояния между частицами. В зависимости от величины нагрузки система может оставаться в зоне преобладания сил притяжения между частицами, либо перемещаться в зону преобладания сил отталкивания. В первом случае при снятии нагрузки силы притяжения будут стремиться вернуть систему в исходное равновесное состояние. В случае глинистых грунтов это условие соответствует условиям проявления ими деформационных свойств и ограничивает предел нагрузок, при которых они должны определяться.

Такие представления лежат в основе принципов исследования деформационных свойств глинистых грунтов с позиций физико-химической теории реальных эффективных напряжений, которые, аналогично реальной эффективной прочности, могут быть названы *реальной эффективной деформируемостью*. В результате исследований должно быть установлено значение реального эффективного напряжения σ'' на контактах грунта, соответствующее величине энергетического минимума.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Также, как и при исследовании реальной эффективной прочности глинистых грунтов, основная проблема заключается в том, что лабораторная приборная база в настоящее время не дает возможности непосредственного измерения напряжений на контактах минеральных частиц. Для определения реальной эффективной прочности контактов в глинистых грунтах была разработана методика расчета [5], основанная на результатах испытаний грунтов методом чистого сдвига (скашивания) и растяжения, когда передаваемые на грунт нагрузки равномерно распределяются по всей зоне их действия и полностью передаются только на контакты. Дополнительного расхода энергии на изменение объема испытываемого грунта, его уплотнение, разрушение, разрыв сплошности и т.п. при таких испытаниях не происходит. В этом случае становится возможным расчетным путем определить реальные эффективные напряжения в элементарном объеме грунта в зоне действия нагрузок в каждый момент времени. Величина реального эффективного напряжения (σ'') равна значению общего эффективного напряжения (σ'), определяемого как сумма всех напряжений в элементарном объеме грунта, за вычетом порового давления (σ_w), из которого вычитается величина расклинивающего действия гидратных пленок частиц (P_h). Применение такой методики позволило получить характеристики реальной эффективной прочности каждого преобладающего типа контакта для разновидностей глинистых грунтов различного минерального состава. Основные принципы методики определения и расчета реальной эффективной прочности глинистых грунтов применимы и для определения их деформационных свойств.

При исследовании деформационных свойств связных грунтов с физико-химических позиций применяется тот же, что и при изучении прочности, метод расчета реальных эффективных напряжений. При этом важно конкретизировать предельную величину напряжений, при которой глинистые грунты будут проявлять деформируемость.

Как уже было показано выше, величина реальной эффективной деформируемости грунта обусловлена глубиной потенциального минимума энергетического взаимодействия частиц. Основным вопросом при этом заключается в определении предельного значения реального эффективного напряжения, соответствующего величине потенциального минимума.

Деформируемость является обратимым свойством грунта — после снятия сжимающей нагрузки происходит соответствующее восстановление деформаций. Выше уже говорилось, что грунты проявляют деформационные свойства на участке

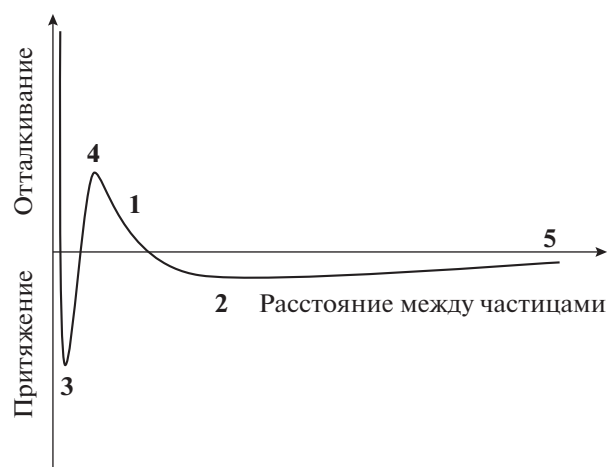


Рис. 2. Результирующая кривая энергетического взаимодействия в дисперсной системе (1); 2, 3 — дальний и ближний потенциальные минимумы; 4, 5 — ближний и дальний энергетические барьеры.

линейного деформирования, где соблюдается прямо пропорциональная зависимость деформации от нагрузки, при превышении которой деформации приобретают необратимый характер. С позиций физико-химической механики дисперсных систем, такой характер деформирования дисперсной системы возможен при ее нахождении в области преобладания сил притяжения между частицами (участок 2 кривой энергетического взаимодействия на рис. 2). При снятии внешней нагрузки силы притяжения между частицами стремятся вернуть систему в исходное состояние, что, собственно, и обуславливает ее деформируемость.

Следовательно, предельной величиной реальных эффективных напряжений, при которой проявляется деформируемость глинистых грунтов, является величина энергетического минимума сил взаимодействия частиц в них. Эта величина соответствует предельной нагрузке при испытаниях грунтов, при которой соблюдается принцип их линейной деформируемости.

Определение деформационных свойств грунтов проводилось на основе анализа результатов их испытаний в условиях растяжения и трехосного сжатия.

Испытания в условиях трехосного сжатия осуществляли по консолидировано-дренированной схеме приложения нагрузок. В процессе испытаний к грунтам прикладывалась осевая нагрузка, которая снималась после достижения грунтом предела линейной деформируемости. Наряду со специально выполненными испытаниями (всего более 100 испытаний) для расчета реальной эффективной деформируемости использовалась обширная база результатов трехосных испытаний

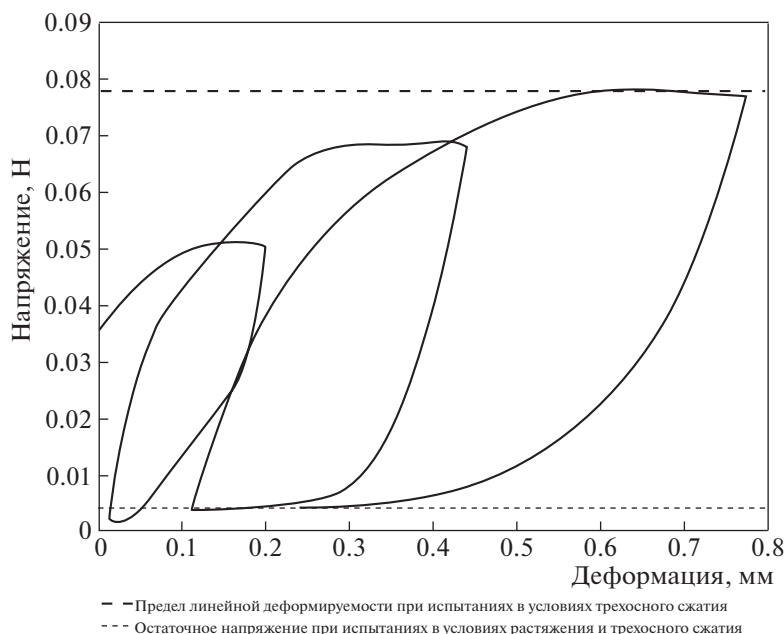


Рис. 3. Изменение напряжения в глинистом грунте при деформировании методом растяжения со ступенчатым приложением нагрузок и разгрузкой.

глинистых грунтов, проведенных в лаборатории изучения состава и свойств грунтов ИГЭ РАН за многие годы научных и инновационных исследований.

Методика испытаний грунтов в условиях растяжения была описана автором ранее [5] при изучении прочностных свойств глинистых грунтов. Особенности применения описанной методики заключались в условиях приложения растягивающих нагрузок. Растягивающие нагрузки в испытаниях на деформируемость передавались на грунт ступенчато. После окончания деформации под действием нагрузки последняя сбрасывалась, и грунт стремился вернуться в исходное состояние. После стабилизации остаточного напряжения и деформации грунт нагружался повторно более высокой, чем на предыдущей ступени, нагрузкой (рис. 3). Цикл приложения ступенчато возрастающих растягивающих нагрузок и полной разгрузки грунта продолжался до прекращения обратных деформаций, что определяло границу области преобладания сил притяжения между частицами. Разгрузка грунта при более высоком уровне нагружения не приводила к существенному сбросу напряжений и деформаций в грунте. Характерно, что при приложении к глинистым грунтам растягивающих нагрузок и их последующем снятии в них сохраняются остаточное напряжение и деформация, точно так же, как это происходит при испытаниях в условиях трехосного сжатия.

На основании результатов испытаний были рассчитаны реальные эффективные напряжения

в грунтах при их деформировании. Проведенные расчеты показывают полную сходимость результатов испытаний в условиях растяжения и трехосного сжатия. Сводные результаты определения реальной эффективной деформируемости изученных разновидностей глинистых грунтов приведены в табл. 1 и показаны на рис. 4.

Полученные данные позволяют оценить реальную эффективную деформируемость исследованных разновидностей глинистых грунтов и дают объяснение ее сущности, как характеристики свойств глинистых грунтов, присущей им независимо от действия внешних нагрузок. Также, как и прочность, величина реальной эффективной деформируемости грунта зависит от его физико-химического состояния и определяется преобладающим типом контактов между частицами в его структуре.

По результатам определения реальных эффективных напряжений в единичном объеме грунтов были рассчитаны значения реальных эффективных напряжений на индивидуальных контактах при деформировании грунтов, аналогично тому, как это было проведено при исследовании прочностных свойств глин. Результаты проведенного расчета приведены в табл. 2.

Полученные данные показывают, что реальная эффективная деформируемость каждого типа контакта, также как и прочность, не изменяется в зависимости от разновидности грунта. Отличия реальных эффективных напряжений в единичном объеме тяжелых и легких глин, тяжелых и

Таблица 1. Величина реальной эффективной деформируемости разновидностей глинистых грунтов

Грунт	Реальное эффективное напряжение в единичном объеме грунта (в числителе средние, в знаменателе минимальные и максимальные значения), [Н]		
	с преобладающими точечными переходными контактами	с преобладающими ближними коагуляционными контактами	с преобладающими дальними коагуляционными контактами
Глина сапонитовая (Sp)	$\frac{0.597}{0.437-0.747}$	$\frac{0.193}{0.124-0.248}$	$\frac{0.041}{0.035-0.047}$
Глина монтмориллонитовая (Mnt)	$\frac{0.489}{0.360-0.617}$	$\frac{0.150}{0.106-0.177}$	$\frac{0.023}{0.015-0.034}$
Глина каолиновая (Kl)	$\frac{0.406}{0.345-0.469}$	$\frac{0.117}{0.091-0.148}$	$\frac{0.010}{0.007-0.017}$
Глина легкая (gHms)	$\frac{0.347}{0.308-0.395}$	$\frac{0.072}{0.044-0.098}$	$\frac{0.008}{0.006-0.017}$
Суглинок тяжелый (gHms)	$\frac{0.304}{0.281-0.335}$	$\frac{0.057}{0.034-0.083}$	$\frac{0.008}{0.004-0.010}$
Суглинок легкий (gHms)	$\frac{0.253}{0.237-0.280}$	$\frac{0.051}{0.028-0.074}$	$\frac{0.006}{0.003-0.007}$
Супесь (gHms)	$\frac{0.208}{0.191-0.219}$	$\frac{0.033}{0.025-0.038}$	$\frac{0.005}{0.002-0.006}$

легких суглинков и супесей одного минерального состава, приведенные в табл. 2, обусловлены различным количеством частиц глинистых минералов в разновидностях глинистых грунтов.

Выше было показано (см. рис. 3), что при испытаниях глинистых грунтов в условиях растяжения в области деформирования при снятии растягиваю-

щих нагрузок наблюдается остаточное напряжение. Величина этого напряжения в единичном объеме грунта в зоне действия нагрузок остается неизменной на каждой ступени нагружения грунта и равна аналогичной величине для того же грунта, рассчитанной по результатам испытаний в условиях трехосного сжатия после снятия осе-

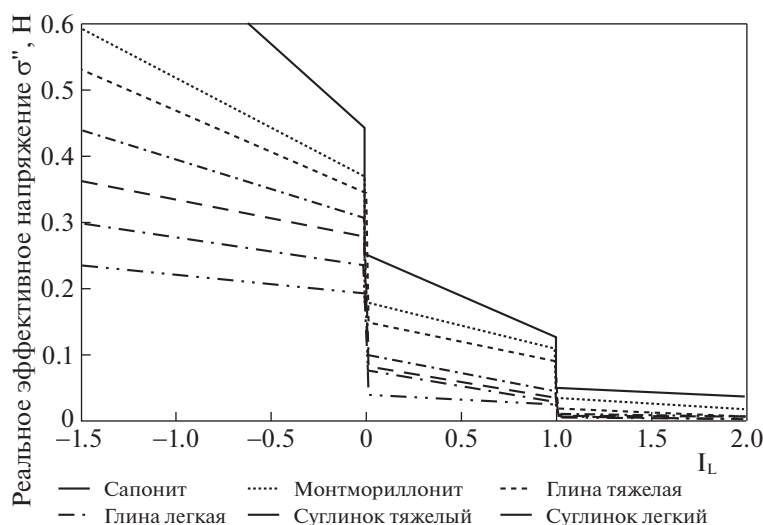

Рис. 4. Зависимость реальных эффективных напряжений в единичном объеме глинистых грунтов при деформировании от содержания влаги.

Таблица 2. Количество и реальная эффективная деформируемость индивидуальных контактов разновидностей глинистых грунтов

Преобладающий минеральный состав глинистой фракции	Разновидность грунта по числу пластичности	Число контактов в элементарном объеме грунта, см ⁻³	Реальная эффективная деформируемость единичного контакта преобладающего типа, Н		
			переходного точечного	ближнего коагуляционного	дальнего коагуляционного
Сапонит	Глина тяжелая	$3 \cdot 10^8$	$6.4 \cdot 10^{-10}$	$2.1 \cdot 10^{-10}$	$4.6 \cdot 10^{-11}$
Монтмориллонит			$5.4 \cdot 10^{-10}$	$1.7 \cdot 10^{-10}$	$2.6 \cdot 10^{-11}$
			$4.7 \cdot 10^{-10}$	$1.0 \cdot 10^{-10}$	$1.5 \cdot 10^{-11}$
Каолинит, иллит	Глина легкая	$2.7 \cdot 10^8 - 2.9 \cdot 10^8$	$4.7 \cdot 10^{-10}$	$1.0 \cdot 10^{-10}$	$1.5 \cdot 10^{-11}$
	Суглинок тяжелый	$2.4 \cdot 10^8 - 2.7 \cdot 10^8$			
	Суглинок легкий	$2.1 \cdot 10^8 - 2.5 \cdot 10^8$			
	Супесь	$1.9 \cdot 10^8 - 2.1 \cdot 10^8$			

вой нагрузки. В то же время, эта величина равна величине расклинивающего давления гидратных пленок (P_h) минеральных частиц данного грунта. Методика и результаты определения величины P_h были рассмотрены ранее [4]. Эти данные показывают, что именно расклинивающее давление гидратных пленок минеральных частиц грунта препятствует его возвращению в исходное состояние при снятии деформирующих нагрузок и объясняет различия показателей деформационных свойств грунтов, определяемых при его нагружении и снятии нагрузки.

Обоснованность применения физико-химического подхода для понимания и определения деформационных свойств глинистых грунтов подтверждает анализ их зависимости от условий проведения испытаний. Выше был рассмотрен

вопрос изменения величины модуля деформации в зависимости от величины объемного давления, при котором проводятся испытания (см. рис. 1). Расчет реальных эффективных напряжений в единичном объеме грунта, выполненный по результатам тех же опытов и в тех же диапазонах напряжений, при которых проводилось определение модуля деформации, дает принципиально иные представления о деформационных свойствах исследованных грунтов. Результаты расчета представлены на рис. 5. Видно, что величина реальных эффективных напряжений остается неизменной независимо от величины объемного давления.

Это подтверждает сделанный выше вывод о том, что реальная эффективная деформируемость является объективной характеристикой свойств глинистого грунта, присущей именно ему в зависимости от его внутреннего строения и не зависящей от внешних воздействий.

Таким образом, реальная эффективная деформируемость грунта является предельной величиной нагрузки на контактах, при которой сохраняется преобладающее действие на них сил притяжения и обусловленный ими упругий характер деформирования. Эта величина постоянна для каждого грунта, присуща ему в его конкретном физико-химическом состоянии и не зависит от величины объемного давления.

ВЫВОДЫ

В современных условиях определение деформационных свойств глинистых грунтов проводится на основе научно-методической и нормативной базы, общепринятой и применяемой в мировой практике инженерно-геологических исследований. В то же время, практические результаты таких исследований во многих случаях име-

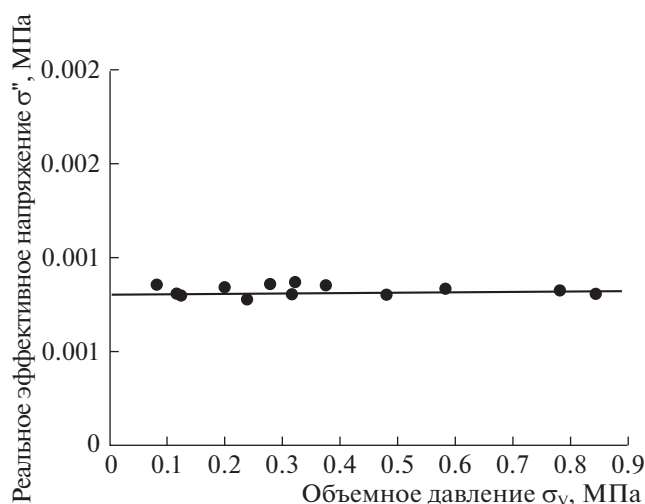


Рис. 5. Зависимость реальных эффективных напряжений при деформировании в единичном объеме глинистых грунтов от величины объемного давления.

ют противоречивый характер. Многие возникающие противоречия не могут быть объяснены с позиций существующих теоретических представлений, что создает условия и предпосылки для разработки нового теоретического и практического подхода к рассмотрению природы и определению деформационных свойств глин.

Рассмотренный подход базируется на положениях физико-химической теории реальных эффективных напряжений в грунтах и основан на определении сил взаимодействия слагающих глинистые грунты компонентов — минеральных частиц и гидратных пленок вокруг них, определяющих структурное строение грунта и его реакцию на действие внешних нагрузок.

Формирование структуры глин происходит в результате взаимодействия частиц глинистых минералов и образования контактов между ними. В естественном состоянии глинистый грунт находится в наиболее энергетически устойчивом состоянии, так называемой “энергетической яме”, в котором действие сил притяжения между частицами максимально и обеспечивает стабильность глинистой системы. Действие внешних нагрузок нарушает энергетическое равновесие на контактах и меняет баланс сил взаимодействия на них в зависимости от величины нагрузок.

В условиях нагружения, при которых внешние нагрузки не превышают величины потенциального минимума, на контактах продолжают преобладать силы притяжения между частицами. Эти силы противодействуют внешним нагрузкам и стремятся вернуть систему в первоначальное положение, что и происходит при их снятии. В этих условиях глинистые грунты проявляют упругие деформационные свойства.

Превышение внешними нагрузками величины потенциального минимума приводит к дальнейшему изменению баланса сил взаимодействия на контактах. Действие сил притяжения при этом компенсируется действием внешних нагрузок, и на самих контактах преимущественно действуют силы отталкивания между частицами. Это приводит к необратимым изменениям структуры грунта и, даже в случае прекращения действия внешних нагрузок, система не может самостоятельно вернуться в исходное состояние, проявляя тем самым отсутствие упругих и развитие пластических деформаций.

Определенные в соответствии с этими положениями значения реальных эффективных напряжений на контактах глинистого грунта, соответствующих величине потенциального минимума, определяют его реальную эффективную деформируемость.

Проведенные исследования показали, что основные разногласия между традиционным и физико-химическим подходом к определению де-

формационных свойств связанных дисперсных грунтов связаны с учетом влияния нагрузок, действующих на грунт. Этим же обусловлены основные противоречия, возникающие в практике испытаний грунтов на деформируемость.

Теория реальных эффективных напряжений в грунтах оценивает действие на структурные контакты всех внешних нагрузок. В этом заключается ее принципиальное отличие от традиционной механики грунтов, рассматривающей зависимость деформационных свойств грунтов только от осевого напряжения.

Необходимость учета влияния всех нагрузок на грунт подтверждают результаты проведенных испытаний на растяжение, при которых вся растягивающая нагрузка передается на грунт. Величина растягивающего напряжения соответствует общему напряжению в грунте при его испытаниях в условиях трехосного сжатия в пределах линейной деформируемости.

Такой подход к оценке напряжений в глинистом грунте при деформируемости позволяет определить его деформационные свойства как присущую только этому грунту характеристику его строения и характера структурных связей, не зависящую от условий проведения испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дерягин Б.В. Теория гетерокоагуляции, взаимодействия и слипания разнородных частиц в растворах электролитов // Коллоидный журнал. 1954. Т. 16. № 6. С. 425–438.
2. Дерягин Б.Ф., Чураев Н.В. Смачивающие пленки. М.: Наука, 1984. 137 с.
3. Дерягин Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. М.: Наука, 1986. 205 с.
4. Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Кальберген Р.Г. Влияние расклинивающего действия гидратных пленок на прочностные свойства глинистых грунтов // Геоэкология. 2018. № 4. С. 91–97.
5. Карпенко Ф.С. Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // Геоэкология. 2019. № 5. С. 48–60.
6. Кутергин В.Н., Кальберген Р.Г., Карпенко Ф.С. Методы лабораторных исследований связанных грунтов: совершенствование на основе современных научных представлений // Сб. Сергеевские чтения. М.: РУДН, Вып. 18. 2016. С. 759–764.
7. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИГЭ РАН, 2012. 74 с.
8. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
9. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика — новая область наук. М.: “Знание”, 1958. 64 с.
10. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур // Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966. С. 3–16.

11. *Рибиндер П.А.* Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 384 с.
12. *Урьев Н.Б.* Высококонцентрированные дисперсные системы. М.: Химия, 1980. 319 с.
13. *Урьев Н.Б.* Физико-химическая динамика дисперсных систем и минералов. Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2013. 232 с.
14. *Цытович Н.А.* Механика грунтов: Краткий курс: Учебник. Изд. 5-е. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009. 272 с.
15. *Яминский В.В., Пчелин В.А., Амелина Е.А., Шукин Е.Д.* Коагуляционные контакты в дисперсных системах. М.: Химия, 1982. 185 с.
16. *Osipov V.I., Karpenko F.S., Rumyantseva N.A.* Active porosity and its effect on the physical mechanical properties of clay // *Water Resources*. 2015. V. 42. №. 7. P. 951–957.

PHYSICOCHEMICAL NATURE OF CLAY SOILS DEFORMABILITY

F. S. Karpenko

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science,
Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia
E-mail: kafs08@bk.ru*

In some cases, the tests on deformation properties of clayey soils have ambiguous, contradictory results that require clarification. Modern scientific concepts allow us to fix these problems, but do not allow us to give them full explanation and understanding. This is due to the fact that the provisions on deformability of soil mechanics are based on the principles of elasticity theory (Hooke's law). In the case of clay soils, these provisions do not make it possible in all cases to characterize comprehensively the soil response to external load. This is because the theory of elasticity is developed for solid elastic bodies and does not take into account the internal structure of clays. In the present paper, the problems in determining the strength of clay soils are considered from the standpoint of the physicochemical theory of effective stresses. This theory is based on the ideas of the internal structure of clays. The main idea implies that the structure of clays depends on the contacts formed between mineral particles, where the external stresses transmitted to soil are concentrating. The prevailing type of structural contacts in clays determines the properties of the latter. Deformability is a special property of clay soils controlled by its composition and internal structure independent of the conditions of load application to it and characterized by the actual effective deformability value. This is the maximal stress transferred to the soil contacts that does not exceed the value of the potential minimum at which the attracting forces between the particles continue to prevail at the contacts. Under these conditions, clay soils exhibit elastic deformation properties. The actual effective deformability in soils with the same predominant type of contacts depends on the number of contacts. The numerical deformability characteristics of contact types are determined for different clay soil varieties to characterize the actual effective deformability. The parameters of relationship between the actual effective deformability in clays and their deformability characteristics are obtained from the soil testing by standard methods.

Keywords: *deformability, structural contacts, contact type, number of contacts, potential minimum, actual effective stresses, actual effective deformability*

REFERENCES

1. Deryagin, B.V. *Teoriya geterokoagulyatsii, vzaimodeistviya i slipaniya raznorodnykh chastits v rastvorakh elektrolitov* [Theory of heterocoagulation, interaction and adhesion of dissimilar particles in electrolyte solutions]. *Kolloidnyi zhurnal*, 1954, vol. 16, no. 6, pp. 425–438. (in Russian)
2. Deryagin, B.V., Churaev, N.V. *Smachivayushchie plenki* [Wetting films]. Moscow, Nauka Publ. 1984, 137 p. (in Russian)
3. Deryagin, B.V. *Teoriya ustoichivosti kolloidov i tonkikh plenok* [Theory of stability of colloids and thin films]. Moscow, Nauka Publ. 1986, 205 p. (in Russian)
4. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G. *Vlianie rasklinivayushchego deistviya gidratnykh plenok na prochnostnye svoystva glinistykh gruntov* [Influence of the wedging action of hydrate films on the strength properties of clay soils]. *Geoekologiya*, 2018, no. 4, pp. 91–97. (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. Kutergin, V.N., Kalbergenov, R.G., Karpenko, F.S. *Metody laboratornykh issledovaniy svyaznykh gruntov: sovershenstvovanie na osnove sovremennykh nauchnykh predstavlenii* [Methods of laboratory studies of cohesive soils: improvement on the basis of modern scientific concepts]. *Sergeevskie chteniya*. [Proc. of the 18th scientific conference in commemoration of academician E.M. Sergeev]. Moscow, 2016, vol. 18. pp. 759–764. (in Russian)
7. Osipov, V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh* [Physicochemical theory of ef-

- fective stresses in soils]. Moscow, IGE RAN, 2012, 74 p. (in Russian)
8. Osipov, V.I., Sokolov, V.N. *Gliny i ikh svoystva. Sostav, stroyeniye i formirovaniye svoystv* [Clays and their properties. Composition, structure and formation of properties]. Moscow, GEOS Publ., 2013, 576 p. (in Russian)
9. Rebinder, P.A. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika – novaya oblast' nauk* [Physicochemical mechanics as a new field of science]. Moscow, Znanie Publ., 1958, 63 p. (in Russian)
10. Rebinder, P.A. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika dispersnykh struktur* [Physicochemical mechanics of disperse structures]. Moscow, Nauka Publ., 1966, pp. 3–16. (in Russian)
11. Rebinder, P.A. *Izbrannyye trudy. Poverkhnostnyye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Fiziko-khimicheskaya mekhanika* [Selected works. Surface phenomena in disperse systems. Physicochemical mechanics]. Moscow, Nauka Publ. 1979, 384 p. (in Russian)
12. Ur'ev, N.B. *Vysokokontsentrirrovannyye dispersnyye sistemy* [Highly concentrated dispersed systems]. Moscow, Khimiya Publ., 1980, 319 p. (in Russian)
13. Ur'ev, N.B. *Fiziko-khimicheskaya dinamika dispersnykh sistem i mineralov* [Physicochemical dynamics of disperse systems and minerals]. Dolgoprudnyi, Intel- lekt Publ., 2013, 232 p. (in Russian)
14. Tsytoich, N.A. *Mekhanika gruntov: kratkiy kurs: uchebnik. Izdanie pyatoye* [Soil mechanics: A short course: A textbook. Fifth edition]. Moscow, LIBRO- KOM Publ., 2009, 272 p. (in Russian)
15. Yaminskii, V.V., Pchelin, V.A., Amelina, E.A., Shchukin, E.D. *Koagulyatsionnyye kontakty v disper- snykh sistemakh* [Coagulation contacts in dispersed sys- tems]. Moscow, Khimiya Publ., 1982, 185 p. (in Rus- sian)
16. Osipov, V.I., Karpenko, F.S., Romyantseva, N.A. Ac- tive porosity and its effect on the physical mechanical properties of clay. *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 7, pp. 951–957.