

УДК 624.131.4

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ПРОЧНОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

© 2019 г. Ф. С. Карпенко

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия
E-mail: kafs08@bk.ru*

Поступила в редакцию 14.06.2019 г.

Рассматриваются научно-методические вопросы определения прочностных свойств глинистых грунтов. Показано, что многочисленные противоречия теоретических положений, 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 прочность рассматриваются с позиций физико-химической теории реальных эффективных напряжений в грунтах. Это позволило разработать новый подход к пониманию сущности и природы устойчивости и проявления прочностных свойств глинистых грунтов как дисперсных систем.

В соответствии с положениями теории проведены экспериментальные исследования с целью характеристики реальной эффективной прочности глинистых грунтов. На основе полученных результатов дана характеристика контактов различного типа.

Определена взаимосвязь реальной эффективной прочности глинистых грунтов с показателями их прочности, определенными традиционными методами по различным схемам нагружения.

Ключевые слова: *прочность, структурные контакты, тип контакта, гидратные пленки, реальные эффективные напряжения, реальная эффективная прочность.*

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019548-60>

ВВЕДЕНИЕ

Одно из наиболее важных свойств грунтов, определяемых при проведении инженерно-геологических изысканий, – их прочность. Именно прочность определяет устойчивость грунта под воздействием различных факторов и нагрузок и, соответственно, устойчивость сооружений, и, в большинстве случаев, лежит в основе принимаемых конкретных проектных решений при строительстве.

В современной практике сформирован комплекс методов определения прочности грунтов. Все они базируются на единой фундаментальной теоретической базе и применяются практически без принципиальных изменений уже многие десятилетия. Их результаты используются для расчетов несущей способности и устойчивости грунтов при проектировании и строительстве различных сооружений.

Устоявшаяся практика определения прочности грунтов позволяет успешно решать множество прак-

тических задач, стоящих перед инженерно-геологическими изысканиями. Наряду с этим за все время исследований накоплено множество противоречий теоретических положений и расчетов с реальным поведением грунтов под действием нагрузок. Особенно сильно такие противоречия начинают проявляться в современных условиях строительства, отличающихся возрастающими нагрузками на грунты основания, их сложным сочетанием и длительностью воздействия. В наибольшей степени это касается глинистых грунтов, для которых эти противоречия проявляются наиболее остро.

Все это ставит перед исследованиями прочностей грунтов ряд вопросов, ответы на которые действующая теория дать не может. Очевидно, в настоящее время созрели предпосылки для разработки и практического применения нового направления изучения прочности глинистых грунтов, базирующегося на современных научных представлениях об их строении и природе формирования, проявления и изменения свойств.

Для реализации этого необходимо провести анализ действующих теоретических представлений и современных данных о строении и свойствах глинистых грунтов. Это позволит определить направления исследований, результаты которых позволят решить означенную задачу.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Общепринятые методы определения прочности грунтов базируются на принципах трения, принятых в механике твердых тел, применяемых в грунтоведении как теория прочности Мора–Кулона, и теории эффективных напряжений Терцаги.

Теория прочности Мора–Кулона (O. Mohr, Ch.A. de Coulomb) в механике грунтов описывает сопротивление грунта действующим на него нагрузкам. Согласно этой теории, под действием сдвиговых нагрузок в грунте формируются площадки скольжения, на которых концентрируются напряжения, и сдвиг происходит именно по этим площадкам. Предельное напряженное состояние грунта при трении выражается через коэффициент трения, зависящий от внешнего давления, и сцепление, независимое от внешнего давления. Эти положения, разработанные для твердых упругих тел в классической механике, были адаптированы в практике грунтоведения и применяются по настоящее время для определения прочностных свойств грунтов. При этом не учитываются особенности строения грунтов и важная роль содержащейся в них воды.

Теория эффективных напряжений К. Терцаги (K. Terzaghi) частично решает эту проблему. В ней рассматривается влияние воды, заполняющей поры грунта, на его свойства, в том числе прочность. Одно из важнейших положений этой теории – давление, передаваемое на грунт, воспринимается именно содержащейся в нем поровой водой. В результате этого в грунте создается избыточное поровое давление. При возможности оттока поровой воды поровое давление постепенно “рассеивается”, и передаваемая на грунт нагрузка воспринимается его минеральным скелетом. Соответственно, общее напряжение в грунте складывается из давления в поровой воде и давления в минеральном скелете. С учетом этих положений теории Терцаги закон Кулона в механике грунтов определяет, что касательное напряжение τ , при котором происходит разрушение грунта, определяется давлением в минеральном скелете σ , давлением в поровой воде U и сцеплением C :

$$\tau = (\sigma - U) \cdot \operatorname{tg}\varphi + C,$$

где $\operatorname{tg}\varphi$ – коэффициент внутреннего трения (коэффициент зависимости касательного напря-

жения от нормального и порового давления), а величина φ – угол внутреннего трения.

Эта зависимость в общем случае позволяет описать поведение грунта под действием нагрузки, но не раскрывает физической сущности прочности. В зависимости от условий приложения нагрузок, при которых происходит испытание грунта, меняются параметры зависимости касательного напряжения τ от давления в минеральном скелете σ , т.е. собственно параметры прочности. Соответственно, при разных схемах нагружения определяется прочность грунта в тотальных и эффективных напряжениях, дренированная и недренированная, консолидированная и неконсолидированная, мгновенная и длительная, остаточная и др. Каждая из этих характеристик прочности имеет параметры φ и C , отличные от полученных при испытаниях по другим схемам приложения нагрузок.

Такой подход к определению прочности приводит к тому, что ее величина не имеет определенного понятийного смысла. Это положение было сформулировано Н.А. Цытовичем [14], писавшим, что “величины φ и C следует рассматривать лишь как математические параметры прямолинейной диаграммы сдвига связных грунтов...”. В настоящее время многие полагают понятие прочности размытым, принимая ее условной величиной, имеющей физический смысл для текущего определенного физического состояния дисперсного грунта, плотность и влажность которого изменяются при этом в процессе деформирования.

Теория прочности Мора–Кулона стала общепринятой в механике грунтов и применяется в практических исследованиях уже многие десятилетия. Несмотря на противоречия, возникающие при ее приложении к грунтам, ее применение в течение длительного времени позволяло вполне удовлетворительно определять прочность грунтов в соответствии с практическими задачами строительства. В настоящее время условия строительства все более усложняются, сооружения становятся все более сложными и ответственными, с длительным сроком эксплуатации и сложными разнообразными нагрузками, передаваемыми на грунты оснований. С другой стороны, современные системы измерения и контроля позволяют выявлять все большее количество разнообразных, неравномерных, разнонаправленных и др. деформаций и подвижек грунтов и строительных сооружений, учет которых был невозможен ранее. В этих условиях выявляется все большее несоответствие теоретических представлений о поведении грунтов с позиций теории прочности с их поведением в реальных условиях, которое не может быть объяснено в ее рамках. Наиболее ярко эти

противоречия проявляются при исследованиях глинистых грунтов. Для разрешения этих разногласий разрабатываются многочисленные варианты модификации теории прочности Мора–Кулона, активно появляющиеся в последнее время в научной и методической литературе. Главным образом эти разработки проводятся в двух направлениях: изменение методов расчетов параметров прочности или разработка новых схем проведения испытаний глин.

В основном предложения по изменению схем проведения испытаний глинистых грунтов на прочность направлены на то, чтобы исключить изменение состояния грунта и отток поровой воды из него в процессе испытания. Так, например, требования по расчету скорости деформирования грунта при сдвиговых и трехосных испытаниях прочности глин на основе параметров консолидации входят в британский стандарт (BS¹). Они же частично включены в последнюю редакцию российского стандарта ГОСТ 12248². Такие “технологические” изменения в отдельных случаях позволяют снизить влияние указанных факторов на ход и результаты экспериментальных испытаний, в других же, наоборот, вносят дополнительную сложность и неопределенность, и порой значительную, в определение механических свойств связных грунтов и трактовку результатов исследований.

Эти и другие методические изменения, зачастую носящие эмпирический характер, позволяют в некоторой степени учесть и снизить влияние на определяемые параметры прочности глин отдельных факторов в различных конкретных условиях нагружения. При этом они разрабатываются в рамках общепринятой теории прочности и не могут разрешить все расхождения между принятой теорией и результатами практических испытаний во всех случаях. Очевидно, применение теории прочности Мора–Кулона к глинистым грунтам несет в себе ряд внутренних противоречий, для преодоления которых необходимо разработать новый подход к рассмотрению и определению их прочности. Для формирования такого подхода необходимо определить суть возникающих противоречий и рассмотреть современные научные представления о строении и свойствах глин, позволяющие их преодолеть.

Основная причина неопределенностей, возникающих при применении теории прочности

Мора–Кулона к дисперсным грунтам, заключается в том, что эта теория, разработанная для сплошных тел, не рассматривает внутреннее строение грунтов. Соответственно, она не позволяет учитывать реакцию на изменение их внутреннего строения грунтов под действием внешних нагрузок. Теория эффективных напряжений Терцаги допускает возможность учета влияния воды, находящейся в порах грунта. Это позволяет достаточно полно охарактеризовать прочностные свойства несвязных (песчаных) грунтов. В случае глинистых грунтов, строение и свойства которых определяются действием большего количества факторов, применение этих теоретических представлений затрудняет полную объективную оценку их свойств.

Теоретические модели, направленные на изменение подхода к определению прочности глин, основанные на особенностях их внутреннего строения, разрабатывались уже достаточно давно. Наиболее принципиальные изменения в теоретическом понимании природы прочности глин были внесены Н.Н. Масловым [2, 3] и И.П. Ивановым [1].

Н.Н. Маслов, основываясь на закономерностях, открытых Г.А. Андреевым и подтвержденных В.Д. Казарновским, описал двойственный характер сцепления, определяемого по закону Кулона, и разработал схему определения двух его составляющих:

- связность глины, обусловленная склеивающей способностью коллоидных оболочек на поверхности глинистых частиц и изменяющаяся в зависимости от нормального напряжения и влажности;
- структурное сцепление – постоянная величина, характерная для каждого глинистого грунта, обусловленная наличием в породе жестких связей, действующих между слагающими его частицами.

Оба этих параметра, в разной степени проявляясь в глинах различного строения и консистенции, суммарно определяют величину общего сцепления.

И.П. Иванов разработал теорию естественной прочности грунта, в соответствии с которой собственная реакция глинистого грунта на внешние воздействия происходит в определенном индивидуальном интервале нагрузок, зависящем от его влажностного состояния. Именно в этом интервале и определяется истинная прочность грунта, что должно исключить возникновение в нем растягивающих напряжений, уплотнения и порового давления.

¹ BS 1377-2:1990 Methods of Test for civil engineering purposes – Part 2. Classification tests. British Standards Institution (BSI). 01.01.2010. 72 p. <http://igs.nigc.ir/STANDS/IPS/e-ce-110.PDF>

² ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2011. 96 с. http://www.testprom.ru/img_user/gosts/93/020/gost_12248-2010.pdf

Идеи Н.Н. Маслова и И.П. Иванова не получили широкого признания и развития, что связано с отсутствием фундаментальной теории, описывающей строение и природу свойств глин. Современные научные данные могут позволить рассмотреть их с новых позиций и оценить сущность предложенных разработок.

Базовым принципом современного научного подхода к изучению строения глин является представление их как дисперсных систем. Дисперсная фаза здесь представлена частицами глинистых минералов, а дисперсионная среда – водой. Свойства глин определяются их микроструктурным строением, формирующимся в результате взаимодействия сил притяжения и отталкивания между частицами и взаимодействием с водой в ходе литогенеза. Вода в микроструктуре глин не только заполняет поровое пространство, но и образует гидратный слой вокруг частиц, оказывая влияние на баланс сил межчастичного взаимодействия.

Представления о глинах как о дисперсных системах базируются на фундаментальных положениях теории ДЛФО (сокр. от теории Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека – теории агрегативной устойчивости лиофобных дисперсных систем), 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 успешно применены В.И. Осиповым [9] в отношении глинистых пород и послужили основой разработанной им физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах.

Именно В.И. Осиповым и В.Н. Соколовым [10] глины рассматривались как дисперсные системы, и было показано, что положения указанных теорий, описывающие закономерности структурообразования и свойств коллоидных систем, достоверно и объективно характеризуют эти же процессы в глинистых грунтах.

Основные положения теории эффективных напряжений в грунтах могут быть в общем виде сформулированы следующим образом:

- структурообразование глин происходит за счет формирования контактов между частицами глинистых минералов;
- вода в глинах не только заполняет поровое пространство, но и формирует гидратные пленки вокруг минеральных частиц;
- все напряжения в грунте передаются на площадки контактов;
- устойчивость каждого контакта определяется силой взаимодействия между частицами и расклинивающего действия гидратных пленок;

- каждый тип контакта имеет свою предельную прочность;
- реальная эффективная прочность глины определяется суммарной прочностью отдельных контактов.

Структурные контакты в глинах формируются на разных стадиях литогенеза и взаимосвязаны с толщиной и строением гидратных пленок частиц. На стадии седиментогенеза формируются дальние коагуляционные контакты. Гидратные пленки при этом имеют максимальную толщину, зависящую от свойств минеральных частиц, и состоят из адсорбционного (α -пленка) и диффузного (β -пленка) слоев. На стадии диагенеза происходит сближение частиц и формирование ближних коагуляционных контактов. Толщина гидратных пленок при этом уменьшается за счет сжатия диффузного слоя, перехода части воды из него в поровое пространство и оттока при уплотнении глины. Дальнейшее сближение частиц и уменьшение толщины гидратных пленок приводит к прорыву последних в местах наибольшего сближения частиц и формированию переходных точечных контактов на стадии позднего диагенеза и раннего катагенеза. В ходе последующих катагенетических и метагенетических изменений глин в них формируются необратимые цементационные контакты, и глины преобразуются в аргиллиты.

Контакты в глинах являются площадками, на которые передаются и где концентрируются внешние нагрузки, действующие на грунт. Каждый индивидуальный контакт имеет свою максимальную прочность, при достижении которой внешним эффективным давлением происходит его разрушение. Прочность контакта зависит от минералогического состава частиц и его типа, зависящего от толщины гидратной пленки частиц и ее свойств. Толщина гидратных пленок, в свою очередь, напрямую взаимосвязана с общим содержанием влаги в нем, что подтверждает зависимость прочности контактов в глинистых грунтах от их влажности. Прочность глинистого грунта как дисперсной системы определяется суммарной прочностью контактов в нем. Для ее характеристики В.И. Осиповым [9] было введено понятие реальной эффективной прочности, которая характеризуется величиной реального эффективного напряжения σ'' на контактах при их разрушении. Эта величина зависит от общего эффективного давления в грунте σ' , количества и площади контактов и расклинивающего действия гидратных пленок P_h . Таким образом, с позиций структурного строения глинистых систем, их прочность определяется величиной реального эффективного напряжения σ'' , при достижении

которой на контактах происходит разрушение структурных связей между ними.

Рассмотренные положения определяют направление экспериментальных исследований глинистых грунтов, результаты которых позволят разработать практический подход к оценке их прочности на основе теории эффективных напряжений в грунтах. Для этого требуется определить и практически применить методы и возможности исследования прочности индивидуальных контактов различного типа и ее зависимости от строения и физико-химического состояния глинистых грунтов. Эта прочность определяется предельной величиной реального эффективного напряжения, при достижении которой внешней нагрузкой происходит разрушение структурных связей грунта, т.е. разрушение контактов. На основе этих данных станет возможна характеристика реальной эффективной прочности глинистых грунтов, т.е. напряженного состояния, в которое они должны быть приведены для разрушения контактов.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современная приборная база 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 результатам исследований прочностных свойств грунтов существующими методами. Для проведения такого расчета условия испытаний должны отвечать определенным требованиям. При проведении испытаний воздействие внешних нагрузок производится только на сами контакты. Дополнительного расхода энергии на изменение объема испытываемого грунта, его уплотнения, разрушения, разрыва сплошности и т.п. происходить не должно. Нагрузки, возникающие в грунте при испытании, должны равномерно распределяться во всей зоне их действия. Это позволяет рассчитывать напряжения, действующие в элементарном объеме грунта в этой зоне, и проводить на этом основании правомерное сопоставление результатов испытаний, выполненных разными методами.

Этим условиям отвечают испытания грунтов в условиях чистого сдвига (скашивания) и растяжения.

Методика испытаний глинистых грунтов методом скашивания и результаты определения этим методом предельных общих эффективных напряжений сдвига разновидностей глинистых грунтов были описаны автором ранее [5]. Суть таких испытаний состоит в приложении к образцу грунта

касательной нагрузки без изменения его объема и нарушения сплошности. В ходе испытания изменяется только форма образца он “перекашивается”, и деформация происходит за счет перемещения частиц дисперсной фазы относительно друг друга. Сопротивление грунта сдвигу в этом случае определяется прочностью его структурных связей. Касательные и нормальные нагрузки при сдвиге равномерно распределяются по всему объему испытываемого образца, и максимальное общее эффективное напряжение σ' в образце за время испытания соответствует сумме предельных напряжений на контактах, приводящих к их разрушению во всем испытываемом образце.

По результатам проведенных испытаний глинистых моренных грунтов Московского региона (gPIms) были получены значения предельных общих эффективных напряжений σ' , равных сумме касательного τ и нормального (σ_1) напряжений в момент разрушения структурных связей в образце за вычетом порового давления (σ_w). Исследовались грунты в различном физико-химическом состоянии, которое определялось содержанием влаги в них. Испытания проводились в условиях полного водонасыщения грунта, чтобы исключить дополнительное действие капиллярных сил. Результаты испытаний позволили выявить закономерности изменения общих эффективных напряжений σ' при разрушении структурных связей (предельных общих эффективных напряжений) для грунтов в текучем, пластичном и твердом состоянии. Полученные данные показывают обусловленность физико-химического состояния глиен преобладанием в их микроструктурном строении, соответственно, дальних коагуляционных, ближних коагуляционных и переходных точечных контактов.

Величина общего эффективного напряжения σ' 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 исключена величина расклинивающего давления гидратных пленок частиц.

Действие расклинивающего давления гидратных пленок P_h проявляется в набухании глинистых грунтов 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 их энергетическое

равновесие. Энергетическое равновесие на контактах в естественных условиях определяется компенсированным взаимодействием сил притяжения и отталкивания между минеральными частицами и расклинивающего действия гидратных пленок. При превышении давлением гидратных пленок на контактах внешнего напряжения в грунте начинает развиваться процесс набухания. Вопрос определения величины расклинивающего действия пленок Π_n при набухании грунтов был рассмотрен ранее в [4]. Было показано, что расклинивающее давление пленок определяет величину давления набухания, и по результатам практических экспериментальных исследований получены его численные характеристики и описаны закономерности изменения при изменении содержания влаги в грунте.

Напряжения, возникающие в образце грунта при испытаниях методом скашивания, равномерно распределяются по всему его объему. Это позволяет расчетным путем определить величину реального эффективного напряжения, равного разнице общего эффективного напряжения и ве-

личины расклинивающего действия пленок при разрушении в его единичном объеме.

Дополнительно к описанным в работе [5] исследованиям аналогичные испытания были проведены для различных связных дисперсных грунтов и мономинеральных глин сапонитового, монтмориллонитового и каолинового состава. Обобщающие результаты всех проведенных испытаний (в общей сложности около 1500), характеризующие величины реальных эффективных напряжений σ'' при разрушении структурных связей в единичном объеме исследованных разновидностей глинистых грунтов, показаны на рис. 1.

Выше уже отмечалось, что прочность структурных контактов глинистых грунтов может быть определена методом растяжения. При таких испытаниях растягивающей нагрузке, прикладываемой к образцу грунта, противодействуют только силы взаимодействия между частицами без участия расклинивающего действия гидратных пленок частиц. Соответственно, разрушение грунта при его растяжении происходит при достижении растягивающей нагрузкой величины

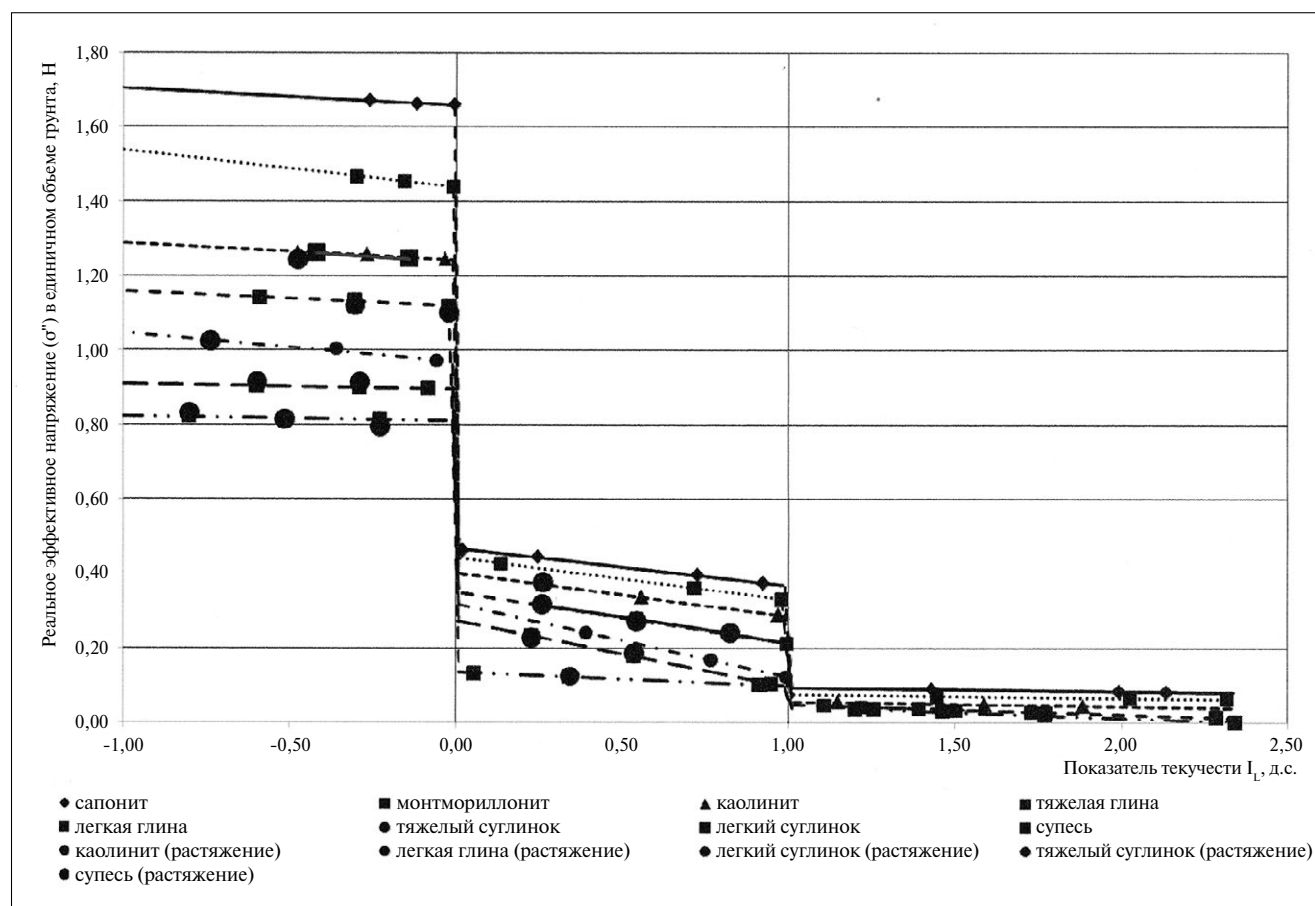


Рис. 1. Зависимость реальных эффективных напряжений σ'' при разрушении структурных связей разновидностей глинистых грунтов от их физико-химического состояния.

реального эффективного напряжения на контактах, при котором происходит их разрушение, в зоне ее действия.

Испытания грунтов на растяжение были проведены для тех же, что и при скашивании, разновидностей глинистых грунтов. Испытания проводились по “бразильскому методу”, в котором боковая сжимающая нагрузка σ_{2-3} , прикладываемая к образцу специальной формы, вызывает возникновение нормального растягивающего напряжения σ_p .

Схема испытаний показана на рис. 2: испытания проводились в специально подготовленных стабилометрах типа Б, в которых возможно приложение только боковой нагрузки к образцу, без действия нормальной нагрузки. Полученные результаты, также характеризующие величину реальных эффективных напряжений σ'' при разрушении структурных связей в единичном объеме грунта, показаны на рис. 1 специальным знаком.

Следует отметить, что результаты определения структурной прочности методом скашивания и растяжения дали практически идентичные результаты. При этом метод скашивания представляется более перспективным в практическом применении, так как подготовка образцов и само проведение испытаний на растяжение значительно более сложное и трудоемкое, испытываться этим методом могут только грунты твердой, полутвердой и, в отдельных случаях, тугопластичной консистенции.

При построении сводных графиков и таблиц использовалось значение показателя текучести грунтов, величина которого непосредственно взаимосвязана с расстояниями между частица-

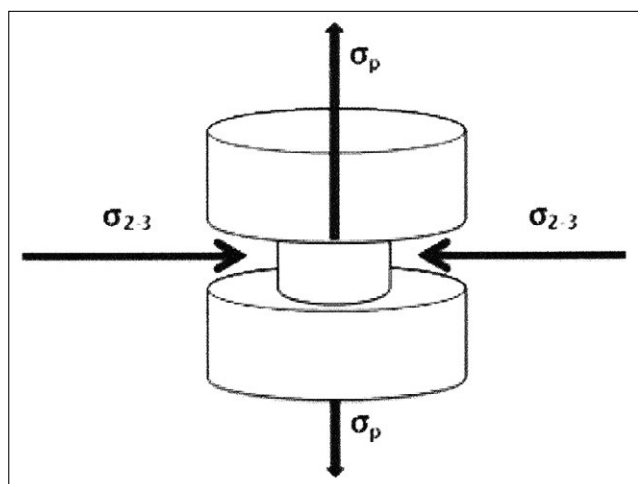


Рис. 2. Принципиальная схема испытаний грунтов на растяжение. σ_{2-3} — боковая сжимающая нагрузка; σ_p — нормальное растягивающее напряжение.

ми глинистой системы. Величина показателя текучести зависит от содержания влаги в грунте, которое в свою очередь определяется толщиной гидратных пленок и, следовательно, расстоянием между частицами грунта. Определение показателя текучести не требует специального высокоточного оборудования и выполняется стандартными методами исследований во всех грунтоведческих лабораториях.

Полученные данные позволили определить прочность преобладающих типов контактов для разновидностей глинистых грунтов. Их средние значения и интервалы изменения в зависимости от преобладающего типа контактов приведены в табл. 1.

Эти результаты дают возможность оценить прочность единичных контактов различного типа для отдельных глинистых минералов. Расчет проводился на основе моделей микроструктур глинистых грунтов, разработанных В.Н. Соколовым [12, 13]. Проведенный расчет, результаты которого приведены в табл. 2, позволил определить прочность единичных контактов минеральных частиц и их количество в элементарном объеме исследованных глинистых грунтов.

Полученные данные показывают, что прочность единичного контакта определяется минеральным составом частиц грунта и не зависит для одного и того же типа контакта от разновидности грунта (глина — суглинок — супесь). Реальная эффективная прочность разновидностей глинистых грунтов с одним и тем же преобладающим типом контактных взаимодействий в таком случае зависит от числа контактов.

Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными В.Н. Соколова, В.И. Осипова и Н.А. Румянцевой [8-10, 12, 13]. Это позволяет применять приведенные выше параметры напряжений в единичном объеме грунта для достаточно достоверной характеристики реальных эффективных напряжений в грунтах в целом.

Проведенные исследования позволяют дать численную характеристику реальной эффективной прочности глинистых грунтов, как результат сил взаимодействия между минеральными частицами грунта на их контактах, и предложить методику ее практического определения. При этом при практическом применении полученных данных возникает закономерный вопрос — выявление взаимосвязи реальной эффективной прочности глин с показателями прочности, определяемыми в повседневной практике при лабораторных испытаниях грунтов в условиях одноплоскостного сдвига и трехосного сжатия по различным

Таблица 1. Величина реальной эффективной прочности разновидностей глинистых грунтов

Грунты с преобладающим точечным переходным типом контактов				
Грунт	Реальное эффективное напряжение в единичном объеме грунта при показателе текучести (I_L)			
	-1.5	-0.5	0.0	Среднее
глина сапонитовая (Sp)	1.727	1.681	1.658	1.689
глина монтмориллонитовая (Mnt)	1.587	1.487	1.438	1.504
глина каолиновая (Kl)	1.313	1.266	1.242	1.273
глина легкая (gIIms)	1.181	1.139	1.118	1.146
суглинок тяжелый (gIIms)	1.086	1.009	0.971	1.022
суглинок легкий (gIIms)	0.918	0.904	0.896	0.906
супесь (gIIms)	0.828	0.817	0.811	0.819
Грунты с преобладающим ближним коагуляционным типом контактов				
Грунт	Реальное эффективное напряжение в единичном объеме грунта при показателе текучести (I_L)			
	0.0	0.5	1.0	Среднее
глина сапонитовая (Sp)	0.467	0.418	0.368	0.418
глина монтмориллонитовая (Mnt)	0.443	0.386	0.329	0.386
глина каолиновая (Kl)	0.402	0.344	0.286	0.344
глина легкая (gIIms)	0.351	0.283	0.214	0.283
суглинок тяжелый (gIIms)	0.320	0.221	0.122	0.221
суглинок легкий (gIIms)	0.274	0.185	0.096	0.185
супесь (gIIms)	0.135	0.117	0.100	0.117
Грунты с преобладающим дальним коагуляционным типом контактов				
Грунт	Реальное эффективное напряжение в единичном объеме грунта при показателе текучести (I_L)			
	1.0	1.5	2.5	Среднее
глина сапонитовая (Sp)	0.095	0.089	0.079	0.088
глина монтмориллонитовая (Mnt)	0.076	0.071	0.062	0.070
глина каолиновая (Kl)	0.058	0.051	0.036	0.048
глина легкая (gIIms)	0.048	0.035	0.010	0.031
суглинок тяжелый (gIIms)	0.047	0.033	0.008	0.029
суглинок легкий (gIIms)	0.043	0.031	0.007	0.027
супесь (gIIms)	0.040	0.028	0.004	0.024

схемам приложения нагрузок. В этих целях был проведен сравнительный анализ напряжений, передаваемых на грунты при проведении таких испытаний, с их реальной эффективной прочностью. Был проведен анализ результатов специально проведенных испытаний описанных выше грунтов, а также испытаний разнообразных глинистых грунтов, выполненных в лаборатории изучения состава и свойств грунтов ИГЭ РАН за длительный

период практической деятельности. Всего проанализированы результаты нескольких тысяч испытаний. Учитывались результаты испытаний грунтов в условиях трехосного сжатия и одноплоскостного среза по консолидированно-дренированной (КД), консолидированно-недренированной (КН) схемам и определения длительной прочности по схемам релаксации напряжений и ползучести, которые регламентируются требованиями ГОСТ

Таблица 2. Количество и прочность контактов разновидностей глинистых грунтов

Преобладающий минеральный состав глинистой фракции	Разновидность грунта по числу пластичности	Число контактов в элементарном объеме грунта	Прочность единичного контакта преобладающего типа, Н		
			переходного точечного	ближнего коагуляционного	дальнего коагуляционного
сапонит	глина тяжелая	$3 \cdot 10^8$	$1.9 \cdot 10^{-9}$	$4.7 \cdot 10^{-10}$	$9.7 \cdot 10^{-11}$
монтмориллонит			$1.7 \cdot 10^{-9}$	$4.3 \cdot 10^{-10}$	$7.7 \cdot 10^{-11}$
каолинит, иллит			глина легкая	$2.7 \cdot 10^8 - 2.9 \cdot 10^8$	$1.4 \cdot 10^{-9}$
	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	$1.9 \cdot 10^8 - 2.1 \cdot 10^8$			

12248 и стандартами предприятия ИГЭ РАН^{3,4}. Рассматривая результаты сдвиговых испытаний, необходимо особо отметить, что анализу подлежали только результаты испытаний, проведенных методом недренированного сдвига, принятым в ИГЭ РАН как стандарт предприятия. Сдвиговые испытания, проводимые по стандартным методикам ГОСТ, имеют ряд существенных недостатков, что уже неоднократно было описано ранее [6, 7], которые приводят к существенному искажению полученных результатов, что делает невозможным их использование в данной работе. Результаты испытаний методом недренированного сдвига, как было показано в тех же работах, близки к результатам трехосных испытаний, что позволило анализировать их совместно.

Для каждого испытания определялось общее суммарное эффективное напряжение (в соответствии с теорией Терцаги), при котором происходило разрушение грунта, которое сопоставлялось с напряжением, соответствующим его реальной эффективной прочности. Для правомерности сопоставления результатов различных испытаний рассчитывались напряжения, возникающие в единичном объеме грунта в зоне действия нагрузок, прилагаемых к нему.

Результаты проведенного анализа показаны на рис. 3, они позволяют охарактеризовать и описать взаимосвязь реальной эффективной прочности

глинистых грунтов со стандартными показателями прочности.

Выше было показано, что реальная эффективная прочность грунта определяется как реальное эффективное напряжение σ'' на контактах в грунте, при превышении которого происходит разрушение структурных связей. Постоянное для каждой разновидности грунта значение реальной эффективной прочности определяется величиной нормального σ_1 , касательного τ , порового σ_w давления, расклинивающего действия гидратных пленок P_h и описывается условием:

$$\sigma'' = \sigma_1 + \tau - \sigma_w - P_h = \text{const.}$$

На графике напряженного состояния реальная эффективная прочность выражается полуокружностью (линия 1 на рис. 3, на которую вынесены результаты отдельных опытов) с радиусом, равным предельной величине реального эффективного напряжения на контактах грунта σ'' , при превышении которой происходит их разрушение.

Общее напряжение в элементарном объеме грунта в зоне приложения нагрузок при испытаниях по консолидировано-дренированной схеме выражается графиком зависимости $\tau - \sigma_1$ (линия 2 на рис. 3) и определяется параметрами ϕ и C . При продлении графика до пересечения с осью абсцисс, на ней отсекается отрезок, равный величине реальной эффективной прочности. Соотношение параметров реальной эффективной прочности σ'' , угла внутреннего трения ϕ и сцепления C определяются соотношением: $\sigma'' = C \text{ctg} \phi$.

Параметры прочности в эффективных напряжениях при испытаниях по консолидировано-недренированной схеме определяются, в соответствии с теорией Терцаги, в зависимости от порового давления σ_w соотношением: $\sigma_1' = \sigma_1 - \sigma_w$.

³ Стандарт организации СТО 93.020-2013/6 Лабораторные определения длительной прочности глинистых грунтов методом релаксации напряжений при трехосном сжатии [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://geoenv.ru/materials/standards/sto-2013-6_long-term-strength.doc

⁴ Стандарт организации СТО 93.020-2013/7 Лабораторные испытания дисперсных грунтов методом недренированного одноплоскостного среза с замером порового давления [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://geoenv.ru/materials/standards/sto-2013-7_section.doc

Общее эффективное напряжение в элементарном объеме грунта и параметры его прочности в эффективных напряжениях при консолидировано-дренированных испытаниях совпадают с теми же параметрами при консолидированных испытаниях. Зависимость $\tau-\sigma_1$ в таких испытаниях так же выражается линией 2 на рис. 3.

Показатели длительной прочности, определяемые по результатам сдвиговых испытаний по методу ползучести или испытаний методом релаксации напряжения в условиях трехосного сжатия, выражаются графиком зависимости $\tau-\sigma_1$ (линия 3 на рис. 3) и определяются параметрами φ_∞ (угол внутреннего трения) и C_∞ (сцепление). Ранее автором с соавторами [11] было показано, что показатели длительной прочности глинистых грунтов характеризуются тем, что значение угла внутреннего трения (φ_∞) остается, по сравнению с испытаниями по консолидировано-дренированной схеме (линия 2 на рис. 3), неизменным. Значение длительного сцепления (C_∞) отличается от соответствующего результата стандартных консолидировано-дренированных испытаний на величину расклинивающего дей-

ствия гидратных пленок частиц (Π_h), главным образом α -пленок, препятствующего нарушению энергетического равновесия дисперсной системы при длительном приложении нагрузок. Величины показателей длительной прочности могут быть определены в соответствии с зависимостями: $\varphi_\infty = \varphi$, $C_\infty = C - \Pi_h$.

Данные, показанные на рис. 3, дают характеристику реальной эффективной прочности глинистых грунтов в сравнении с традиционными показателями и проясняют причины и сущность противоречий этих показателей теоретическим положениям механики грунтов.

Реальная эффективная прочность – интегральная величина внешних нагрузок, при действии которых происходит разрушение структурных связей на контактах в глинистом грунте. На диаграмме напряженного состояния реальная эффективная прочность грунта ограничивает область, определяющую его поведение под нагрузками. В условиях напряженного состояния, характеризующихся тем, что общее напряжение находится внутри этой области, разрушения грунта не происходит. Силы взаимодействия на контактах грунта в этих условиях компенсируют действие внешней нагрузки.

Это положение, по своей сути, соответствует условию максимальной нагрузки, при которой возможно определять прочность грунта, теории естественной прочности И.П. Иванова, объясняя его с позиций взаимодействия структурных контактов минеральных частиц глинистых грунтов.

В условиях, при которых общее напряжение на контактах превышает пределы реальной эффективной прочности, происходит разрушение грунта. Это разрушение имеет неоднозначный характер. Разрушение структурных связей в грунте происходит при общих нагрузках, соответствующих реальной эффективной прочности, и эта величина неизменна для каждого конкретного грунта. Дополнительные нагрузки, прикладываемые к грунту при испытаниях, характеризуют уже не свойства самого грунта, а условия проведения испытания, т.е. работу, которую надо совершить, чтобы передать на контакты грунта напряжение, при котором произойдет их разрушение в тех или иных условиях нагружения. Этим объясняется то, что показатели прочности одного и того же грунта, определенные разными методами, различаются между собой в зависимости от условий испытаний (скорости приложения нагрузок, ее величины, условий дренирования и др.).

Описанные положения позволяют по-новому рассмотреть теоретические разработки определения прочности глинистых грунтов

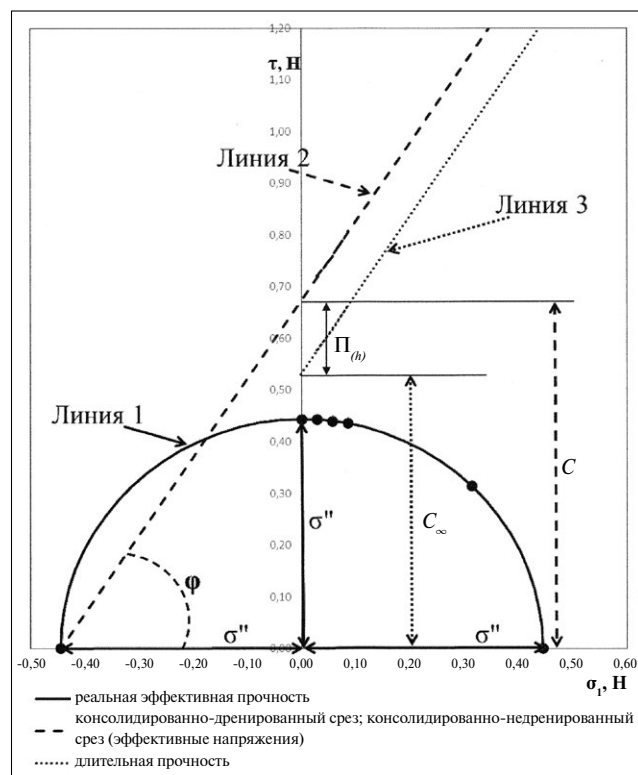


Рис. 3. Соотношение реальной эффективной прочности глинистых грунтов с традиционными параметрами прочности механики грунтов. σ'' – реальная эффективная прочность; Π_h – величина расклинивающего действия гидратных пленок; C – сцепление; φ – угол внутреннего трения; C_∞ , φ_∞ – то же для длительной прочности.

Н.Н. Маслова. По своей сути, выделенная им структурная прочность соответствует реальной эффективной прочности в физико-химическом понимании, и разработанная формула расчета структурного сцепления получила свое подтверждение при условии учета объема грунта, в котором действуют внешние нагрузки.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов выполненных исследований позволяет сформулировать следующие основные выводы.

В современных условиях традиционные методы определения прочности глинистых грунтов зачастую не позволяют ее объективно охарактеризовать. Результаты исследований во многих случаях противоречат реальному поведению глин под действием комплексных длительных нагрузок, присущих современным условиям строительства. Причина этого заключена в теоретической базе определения прочности грунтов. Общепринятые методики определения прочности базируются на положениях механики грунтов, разработанных, в свою очередь, на основе механики сплошных тел и не учитывающих внутреннее строение глин.

Эти вопросы создают предпосылки для формирования нового подхода к рассмотрению прочности глинистых грунтов, отличного от традиционных представлений, который должен учитывать внутреннее строение глин, микроструктуру, особенности взаимодействия между элементами грунта, закономерности их формирования и изменения под действием внешних нагрузок.

Такой подход может быть разработан на основе физико-химической теории реальных эффективных напряжений в грунтах, рассматривающей и описывающей вышеперечисленные вопросы.

По своему строению глины являются дисперсными системами, структурообразование которых происходит за счет взаимодействия минеральных частиц дисперсной фазы между собой и с дисперсионной средой (вода, образующая гидратные пленки на минеральных частицах). В результате этого взаимодействия формируются структурные связи и контакты между частицами.

Каждый единичный контакт, в зависимости от типа и состава частиц, толщины и свойств гидратных пленок, обладает индивидуальной прочностью. Общая прочность глины, обусловленная их микроструктурным строением, называемая реальной эффективной прочностью, определяется суммарной прочностью единичных контактов. Внешние напряжения, передаваемые на глинистый грунт, концентрируются на площадках

контактов. Следовательно, общее напряжение в грунте, при котором происходит разрушение контактов, соответствует величине его реальной эффективной прочности.

Реальная эффективная прочность глинистых грунтов может быть определена расчетным методом по результатам испытаний в условиях растяжения и прямого сдвига “скашивания”. Разработана методика определения и расчета реальных эффективных напряжений на контактах в глинистых грунтах. Результаты исследований позволили определить величину прочности различных типов контактов – дальних и ближних коагуляционных и переходных точечных – на примере некоторых разновидностей глинистых грунтов различного состава. Они показывают, что прочность контактов каждого типа определяется минеральным составом частиц грунта. Различия величин реальной эффективной прочности разновидностей глинистых грунтов (тяжелых и легких глин и суглинков, супесей) обусловлены разным количеством глинистых частиц и, соответственно, контактов в них.

Величина реальной эффективной прочности каждой разновидности глинистого грунта есть постоянная величина, определяемая его строением. Показатели прочностных свойств грунта, угла внутреннего трения и сцепления определяются не только его свойствами, но в большей степени условиями приложения нагрузок и изменяются в зависимости от схемы проведения испытаний. Проведенный анализ позволил определить взаимосвязь показателей прочности при испытаниях по различным схемам с величиной реальной эффективной прочности глинистых грунтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов И.П.* Определение показателей сопротивления сдвига грунтов, характеризующих их естественную прочность // Вестник ЛГУ, 1975. №6. С. 73-79.
2. *Маслов Н.Н.* Прикладная механика грунтов. М.: Изд-во и тип. Машстройиздата, 1949 (Ленинград), 1949. 328 с.
3. *Маслов Н.Н., Котов М.Ф.* Инженерная геология. М.: Стройиздат, 1971. 341 с.
4. *Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Кальбергенов 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 пределов пластичности глинистых грунтов // Геоэкология. 2018. № 5. С. 66-72.
6. *Кутергин В.Н., Кальбергенов Р.Г., Карпенко Ф.С., Седов В.В.* Новые технологии испытаний грун-

- тов на сдвиг // В сб. Сергеевские чтения. Вып. 12. М.: РУДН, 2010. С. 366-372.
7. Кутергин В.Н., Кальбергенов Р.Г., Карпенко Ф.С. Методы лабораторных исследований связных грунтов: совершенствование на основе современных научных представлений // В сб. Сергеевские чтения. Вып.18. М.: РУДН, 2016. С. 759-764.
 8. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород // Под ред. Е.М. Сергеева. М.: Недра, 1989. 211 с.
 9. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИГЭ РАН, 2012. 74 с.
 10. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
 11. Осипов В.И., Карпенко Ф.С., Кальбергенов Р.Г., Кутергин В.Н., Румянцева Н.А. Реологические свойства глинистых грунтов // Геоэкология. 2017. № 6. С. 49-57.
 12. Соколов В.Н. Физико-химические аспекты механического поведения глинистых грунтов // Инженерная геология. 1985. № 4. С. 18-41.
 13. Соколов В.Н. Модели микроструктур глинистых грунтов // Инженерная геология. 1991. № 6. С. 32-40.
 14. Цытович Н.А. Механика грунтов: Краткий курс: Уч. Изд. 5-е. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 272 с.
- joining action of hydrate films influence on strength properties of clay soils]. *Geoekologiya*, 2018, no. 3, pp. 91-97. (in Russian)
5. Karpenko F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda predelov plastichnosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of plasticity limits in clayey soils]. *Geoekologiya*, 2018, no. 5, pp. 66-72. (in Russian)
 6. Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G., Karpenko, F.S., Sedov, V.V. *Novyye tekhnologii ispytaniy gruntov na sdvig* [New technologies in soil shear testing]. *Sergeevskie chteniya*, vol. 12, Moscow, 2010, pp. 366-372. (in Russian)
 7. Kutergin, V.N., Kalbergenov, R.G., Karpenko, F.S. *Metody laboratornykh issledovaniy svyaznykh gruntov: sovershenstvovaniye na osnove sovremennykh nauchnykh predstavlenii* [Methods of laboratory studies of cohesive soils: improvement on the basis of modern scientific concepts]. *Sergeevskie chteniya*, vol. 18, Moscow, 2016, pp. 759-764. (in Russian)
 8. Osipov, V.I., Sokolov, V.N., Rummyantseva, N.A. *Mikrostruktura glinistykh porod* [Microstructure of clayey soils]. E.M. Sergeev, Ed., Moscow, Nedra Publ., 1989, 211 p. (in Russian)
 9. Osipov, V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh* [Physicochemical theory of effective stresses in soils]. Moscow, 2012. 74 p. (in Russian)
 10. 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)
 11. Osipov, V.I., Karpenko, F.S., Kal'bergenov, R.G., Kutergin, V.N., Rummyantseva, N.A. *Reologicheskiye svoystva glinistykh gruntov* [Rheological properties of clayey soils]. *Geoekologiya*, 2017, no. 6, pp. 49-57. (in Russian)
 12. Sokolov, V.N. *Fiziko-khimicheskie aspekty mekhanicheskogo povedeniya glinistykh gruntov* [Physicochemical aspects of the mechanical behavior of clayey soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 1985, no. 4, pp. 18-41. (in Russian)
 13. Sokolov, V.N. *Modeli mikrostruktur glinistykh gruntov* [Models of clay soil microstructures]. *Inzhenernaya geologiya*, 1991, no. 6, pp. 32-40. (in Russian)
 14. Tsytovich, N.A. *Mekhanika gruntov: kratkiy kurs* [Soil mechanics: A short course]. Moscow, LIBROKOM Publ., 2009, 272 p. (in Russian)

REFERENCES

1. Ivanov, I.P. *Opredeleniye pokazatelei soprotivleniya sdvigu gruntov kharakterizuyushchikh ikh estestvennyuyu prochnost'* [Determination of shear resistance parameters in soils that characterize their natural strength]. *Vestnik LGU*, 1975, no. 6, pp. 73-79. (in Russian)
2. Maslov, N.N. *Prikladnaya mekhanika gruntov* [Applied soil mechanics]. Moscow, Mashstroyizdat Publ., 1949, 328 p. (in Russian)
3. Maslov, N.N., Kotov, M.F. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971, 341 p. (in Russian)
4. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G. *Vliyaniye rasklinivayushchego deistviya gidratnykh ple-nok na prochnostnye svoystva glinistykh gruntov* [Dis-

PHYSICO-CHEMICAL NATURE OF CLAYEY SOILS STRENGTH

© 2019 F. S. Karpenko

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

The principles of soil mechanics based on Mohr–Coulomb strength theory and Terzaghi effective stresses theory give us the idea about the nature of clay strength. However, these theories consider the clay as a solid body and do not take into account their internal structure. In the present paper, the problems in determining the strength of clayey soils are considered from the standpoint of the physico-chemical 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 the soil are concentrating. Water in clayey soils not only fills the pore space but also interacts with the mineral particles forming hydrate films around them. The prevailing type of structural contacts in clays determines the properties of latter. Strength is an intrinsic property of soil determined by its composition and internal structure, independent of the conditions of load application to it and characterized by the actual effective strength value. The value of actual effective strength in clays is determined by the total strength of individual contacts. This is the maximal stress transferred to the soil contacts, the structure being ruined upon exceeding this value. The actual effective strength in soils with the same predominant type of contacts depends on the number of contacts. The numerical strength characteristics of contact types are determined for different clay soil varieties to characterize the actual effective strength. The parameters of relationship between the actual effective strength in clays and their strength characteristics are obtained from the soil testing by standard methods.

Keywords: *strength, structural contacts, contact type, number of contacts, hydrate films, actual effective stresses, actual effective strength.*

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019548-60>