
**ГРУНТОВЕДЕНИЕ
И МЕХАНИКА ГРУНТОВ**

УДК 624.131.4

**ВЛИЯНИЕ РАСКЛИНИВАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ГИДРАТНЫХ ПЛЕНОК
НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ**
© 2018 г. Ф. С. Карпенко^{1,*}, В. Н. Кутергин¹, Р. Г. Кальбергенов¹¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., д. 13, стр.2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: kafs08@bk.ru

Поступила в редакцию 17.07.2017 г.

Рассматривается действие расклинивающего давления гидратных пленок минеральных частиц глин, его влияние на результаты определения прочностных свойств. Предложена методика определения величины расклинивающего давления гидратных пленок. На основе экспериментальных исследований изучены закономерности его изменения в зависимости от содержания влаги в глинах. Показано влияние расклинивающего давления гидратных пленок на величину касательного напряжения при сдвиге. Разработана методика определения показателей реальной прочности глинистых грунтов, характеризующих не только уровень внешних воздействий на грунт, но и напряжение на его структурных контактах.

Ключевые слова: глинистые грунты, микроструктура, структурные контакты, α - и β -пленки, гидратные пленки, расклинивающее давление, внутреннее напряженное состояние грунта, давление набухания, реальные эффективные напряжения

DOI: 10.1134/S0869780318040130

В связи с наиболее широким распространением глин среди осадочных пород земной коры и присущим им свойствам, глинистые грунты чаще других используются в качестве основания и материала для строительства. Поэтому определение свойств глин, в первую очередь, их прочностных свойств, имеет не только научное, но и крайне важное прикладное значение при проведении инженерно-геологических изысканий.

В основе практических методик определения прочностных свойств грунтов лежат принципы теории трения тел, заложенные классиками механики еще в XVII–XVIII вв. Впервые закономерности трения были эмпирически установлены Леонардо да Винчи. Позднее, в 1695 г., они были сформулированы французским ученым Г. Амонтоном (G. Amontons), так называемый закон Амонтона. Закон Амонтона определяет закономерности истинного трения соприкасающихся твердых тел. Основные его выводы в общем смысле сводятся к тому, что трение твердых трущихся тел зависит от их природы, прямо пропорционально силе, действующей нормально к плоскости трения, и не зависит от их размера.

Закон Амонтона был модифицирован французским ученым Ш. Кулоном (Ch.A. de Coulomb), разработавшим в 1773 г. теорию прочности сыпучих тел, распространенную позднее и на связные грунты. Закон Кулона, упоминаемый в литературе также как закон Амонтона–Кулона, устанавлива-

ет зависимость, что “предельное сопротивление сыпучих грунтов сдвигу есть сопротивление трению, прямо пропорциональное нормальному давлению”, и определяет предельное напряженное состояние грунта при трении через коэффициент трения, зависящий от внешнего давления и внутренних сил грунта – сцепления. Согласно закону Кулона при сдвиге в грунте формируются площадки скольжения, на которых идет концентрация напряжения и происходит сдвиг.

В 1882 г. немецкий ученый О. Мор (O. Mohr) разработал теорию прочности, показывающую, что прочность грунта на сдвиг зависит не от абсолютных величин нормального и касательного напряжений, а только от их соотношения (дивизор напряжения), и предложил способ графического изображения напряженного состояния грунта, который теперь называется диаграмма или круги Мора. Впоследствии общая теория прочности получила название теории прочности Мора–Кулона.

Теория Мора–Кулона рассматривает глину, как сплошное тело, и не учитывает, что ее свойства во многом зависят от содержащейся в ней воды. Влияние воды, заполняющей поры грунта, на его свойства, в том числе на прочность, рассмотрено в теории эффективных напряжений, разработанной в 1920-х годах американским ученым К. Терцаги (K. Terzaghi) [14–16]. Одним из важнейших выводов этой теории является то, что

давление, передаваемое на грунт, воспринимается не только скелетом грунта, но и содержащейся в нем поровой водой. В результате этого в грунте создается избыточное поровое давление. При возможности оттока поровой воды поровое давление постепенно “рассасывается”, и нагрузка полностью передается на минеральный скелет грунта. Поэтому для водонасыщенного грунта следует считать, что напряжение в нем складывается из давления в поровой воде и давления на минеральный скелет.

Теория прочности Мора–Кулона и теория эффективных напряжений Терцаги стали основой для изучения свойств грунтов, и их успешное применение позволяет решать многочисленные инженерно-геологические исследовательские и изыскательские задачи. Однако в длительной практике накоплено большое количество свидетельств того, что по отношению к глинистым грунтам применение этих теорий оставляет множество противоречий, которые не могут быть решены на их основе.

Причины, вызывающие расхождение между теорией и практикой, были подробно рассмотрены В.И. Осиповым [8]. Принципиально, что эти теории не рассматривают влияния микростроения глинистых грунтов на их свойства, а изучают только влияние внешних напряжений, действующих на грунт. Влияние же внутренних сил, действующих в минеральном скелете глины и влияющих на его общее напряженное состояние, ими не учитывается.

В то же время известно, что при образовании сплошной гидратной пленки связанной воды на коагуляционном контакте внешнее напряжение полностью локализуется в образующейся гидратной пленке и не передается на минеральный скелет. В таких системах вместо внешнего трения развивается граничное трение, обусловленное вязкостью гидратных пленок [3]. С увеличением внешнего напряжения толщина гидратной пленки снижается, а ее вязкость возрастает. В этом заключается принципиальное различие трения на непосредственном (минеральном) контакте песчаных пород и трением на коагуляционных контактах глинистых частиц. Коагуляционный контакт, в свою очередь, сохраняется до тех пор, пока давление набухания гидратной пленки больше внешнего давления на контакт. При превышении внешнего давления на контакте над давлением набухания гидратной пленки, она исчезает, и на образующемся минеральном контакте возникает эффективное напряжение, а трение по своей природе становится внешним трением.

Современные представления о микростроении глин и эффективных напряжениях в них сформулированы в физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах, разработан-

ной В.И. Осиповым [6–9]. В основу этой теории, базирующейся на положениях общепризнанных теорий двойного электрического слоя (ДЭС), теории ДЛФО (сокр. от теории Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека), разработках других ученых (А. Скемптона [18], Д. Митчелла, К. Сога [17]), вошли положения теории контактных взаимодействий П.А. Ребиндера [10–13] и теории расклинивающего действия граничных пленок Б.В. Дерягина [1–5]. Для оценки напряженного состояния грунта и его реальной эффективной прочности наиболее важны следующие положения:

– структурообразование глин происходит за счет формирования контактов между минеральными частицами;

– именно через контакты происходит передача эффективных напряжений на скелет грунта;

– эффективные контактные напряжения могут различаться при одних и тех же внешних эффективных напряжениях за счет действия расклинивающего давления гидратных пленок минеральных частиц.

Цель настоящего исследования – оценить силу расклинивающего давления гидратных пленок и его влияние на реальную эффективную прочность глин.

Действие расклинивающего давления гидратных пленок 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 энергетическое равновесие на них. Энергетическое равновесие на контактах в естественных условиях определяется компенсированным взаимодействием сил притяжения и отталкивания между минеральными частицами и расклинивающего действия гидратных пленок. При превышении давления гидратных пленок на контактах внешнего напряжения в грунте начинает развиваться процесс набухания. Следовательно, максимальное давление набухания (σ_n), которое может развиваться в грунте, есть величина, численно равная суммарному действию расклинивающего давления гидратных пленок (P_n) и возникающего при этом порового давления (σ_w). Соответственно, величина расклинивающего давления гидратных пленок может быть вычислена как разница между величиной давления набухания и порового давления при гидратации грунта:

$$P_n = \sigma_n - \sigma_w.$$

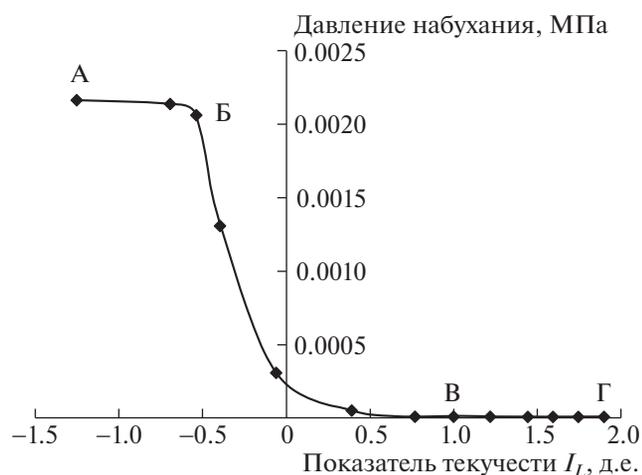


Рис. 1. Характерный график зависимости расклинивающего давления гидратных пленок в глинистых грунтах от содержания влаги.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью изучения расклинивающего давления гидратных пленок в глинистых грунтах была проведена серия экспериментальных исследований по определению давления набухания. Исследования проводились на искусственно приготовленных полностью водонасыщенных образцах мономинеральных глин сапонитового, монтмориллонового, каолинового состава и нескольких разновидностей глинистых моренных грунтов Московского региона различной консистенции (I_L). Результаты исследований позволили установить зависимость величины расклинивающего действия гидратных пленок (P_n) в глинах от содержания влаги в них, а следовательно от их структурного строения и типа контактных взаимодействий.

Как видно на рис. 1, расклинивающее действие гидратных пленок зависит от общего содержания влаги в грунтах, определяющего толщину и строение самих пленок. На общем графике можно условно выделить 3 участка, на которых эта зависимость различна.

Первый участок (участок кривой А–Б) характеризуется наиболее высокими значениями P_n , величина которого практически постоянна, незначительно уменьшается с увеличением значения I_L . Этот участок соответствует грунтам твердой консистенции ($-1.5 < I_L < 0$), в строении которых преобладают точечные переходные контакты с преимущественным развитием адсорбционного слоя ДЭС (α -пленок), проявляющего наибольшее расклинивающее действие.

При увеличении содержания влаги ($0 < I_L < 1$) строение глинистых грунтов определяется преобладанием ближних и появлением дальних коагуляционных контактов с образованием наряду с α -пленками β -пленок (диффузного слоя ДЭС) связанной воды. При этом наибольший расклинивающий эффект проявляют α -пленки. По мере развития диффузного слоя ДЭС частиц и быстрого роста толщины β -пленок расклинивающее действие снижается (участок кривой Б–В).

При дальнейшем увеличении влаги в глинистых грунтах ($I_L > 1$), их строение определяется преобладанием дальних коагуляционных контактов, обусловленным дальнейшим развитием β -пленок и увеличением количества свободной поровой воды. При этом расклинивающий эффект практически полностью исчезает (участок кривой В–Г).

Строение гидратных пленок и тип контактных взаимодействий в глинистых грунтах оказывают существенное влияние на их прочностные свойства. Для оценки этого фактора была проведена серия специальных экспериментальных исследований, суть которых заключалась в сдвиговых испытаниях глинистых грунтов при нулевом эффективном нормальном давлении. Испытания проводились на искусственно приготовленных полностью водонасыщенных образцах мономинеральных сапонитовых глин с различной исходной влажностью по схеме недренированного сдвига по методикам и на оборудовании, разработанным и принятым в ИГЭ РАН в качестве стандарта предприятия¹. В образцах создавалось дополнительное противодавление в поровой воде, что приводило к их гидратации. В результате в испытываемых глинах развивалось давление набухания, обусловленное расклинивающим давлением образующихся гидратных пленок. При достижении грунтом определенной степени набухания (5, 10, 15 и 20%) давление набухания компенсировалось нормальной нагрузкой, после чего проводился одноплоскостной срез. Результаты исследований, приведенные на рис. 2, показывают, что изменение величины расклинивающего действия гидратных пленок приводит к существенному изменению величины касательного напряжения при разрушении даже в условиях неизменного нормального давления, которое не может быть объяснено с позиций повсеместно применяемых в настоящее время теорий прочности грунтов, описанных выше.

Для объяснения полученных результатов необходимо еще раз рассмотреть процессы, проис-

¹ 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

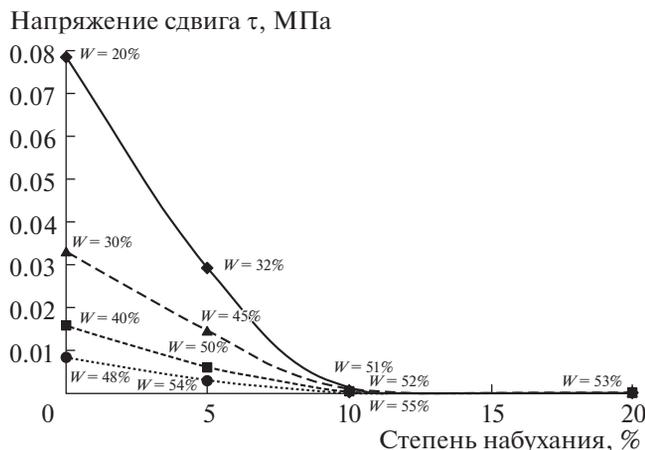


Рис. 2. Изменение касательного сдвигового напряжения в различных условиях набухания глинистого грунта (естественная влажность грунта – 20, 30, 40 и 48%) при нулевой эффективной нормальной нагрузке.

ходящие на контактах грунта при его гидратации. Как отмечалось, гидратация вызывает увеличение толщины гидратных пленок и соответствующее снижение прочности контактов, что приводит к уменьшению прочности грунта. Одновременно, как видно на графике, приведенном на рис. 1, при росте толщины гидратных пленок снижается величина их расклинивающего давления. Восстановление эффективного напряжения на контактах при гидратации глин происходит путем повышения нормального напряжения на величину, равную расклинивающему давлению их гидратных пленок. Компенсация расклинивающего давления путем соответствующего увеличения внешнего давления, как это показано на рис. 2, влияет на величину касательного напряжения. Выполненные эксперименты свидетельствуют о необходимости учета величины расклинивающего давления гидратных пленок при определении прочности глинистых грунтов.

В.И. Осипов в работах [8, 9], рассмотрев физико-химическую природу процессов взаимодействия на контактах глинистых грунтов, ввел для оценки их напряженного состояния понятие реального эффективного напряжения (σ''), которое и отражает реакцию грунта на внешние и внутренние напряжения. Как было показано, величина σ'' определяется типом контакта, зависит от количества, площади и прочности контактов и расклинивающего давления гидратных пленок. Именно величина расклинивающего давления является численным индикатором изменения напряженного состояния глинистого грунта, влияние которого проявляется в изменении касательного напряжения при разрушении.

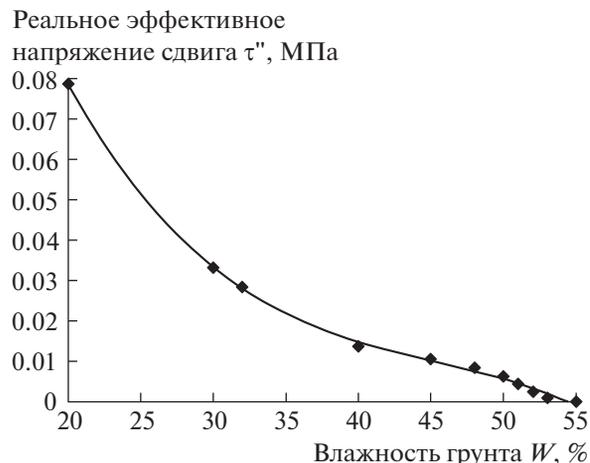


Рис. 3. Зависимость реального эффективного касательного напряжения при сдвиге от влажности глинистого грунта.

Для оценки этого влияния, по аналогии с общим реальным эффективным напряжением (σ''), следует рассматривать реальное эффективное касательное напряжение (τ''), которое и позволит определять реальную прочность глинистого грунта, определяемую как внешним воздействием на грунт, так и внутренними напряжениями в нем, связанными с изменением его микростроения, вызванным этим воздействием. Величина τ'' определяется как разница между значением касательного напряжения τ , определенного при испытаниях грунта на одноплоскостной срез в недеренированных условиях, и величиной расклинивающего давления гидратных пленок (P_h):

$$\tau'' = \tau - P_h.$$

Пересчет результатов экспериментальных исследований, показанных на рис. 2, по рассмотренной схеме позволяет установить зависимость снижения величины реального эффективного касательного напряжения (τ'') при увеличении влажности грунта при гидратации, показанную на рис. 3 на примере сапонитовой глины.

Рассмотренные результаты исследований позволили разработать метод определения реальной эффективной прочности грунта (реального эффективного угла внутреннего трения ϕ'' и реального эффективного сцепления C''), учитывающий величину расклинивающего давления гидратных пленок слагающих грунт частиц. Пример такого определения, выполненный по результатам испытаний образцов тугопластичной каолиновой глины, приведен в табл. 1, а результаты определений соответствующих показателей прочности – в табл. 2. Схема определения реальной эффективной прочности грунта приведена на рис. 4.

Таблица 1. Результаты определения нормальных и касательных напряжений при испытаниях тугопластичной каолиновой глины по схеме недренированного сдвига

Результаты определения нормальных и касательных напряжений, МПа			
в тотальных напряжениях		в эффективных напряжениях	в реальных эффективных напряжениях
σ_1	τ	σ'_1	τ''
0.300	0.110	0.273	0.090
0.325	0.116	0.293	0.096
0.350	0.122	0.316	0.102
0.400	0.134	0.361	0.114
0.450	0.145	0.408	0.125

Приведенные данные показывают, что при учете величины расклинивающего действия гидратных пленок показатели реальной эффективной прочности грунта отличаются от результатов определений прочности грунта в тотальных и эффективных напряжениях, что выражается в более низком значении сцепления. Это свидетельствует, что описанная методика определения реальной эффективной прочности позволяет более полно, по сравнению с традиционными методиками, оценить устойчивость глинистых грунтов. Вычитание из величины общего напряжения, воздействующего на грунт, расклинивающего давления гидратных пленок позволяет охарактеризовать напряженное состояние на контактах, при котором происходит разрушение структуры

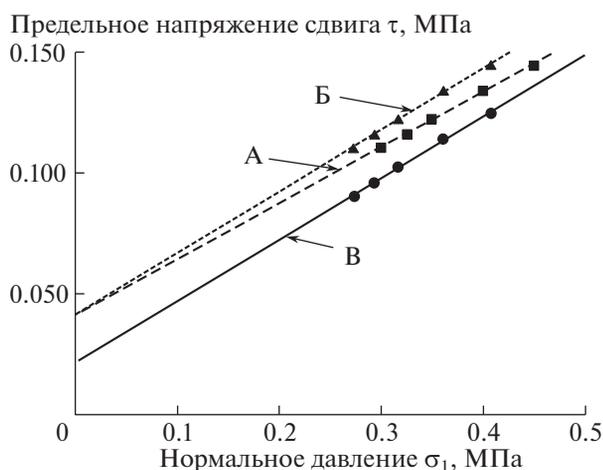


Рис. 4. Схема определения прочности грунта. Линии предельных напряжений сдвига: А – тотальные напряжения; Б – эффективные напряжения; В – реальные эффективные напряжения.

Таблица 2. Характеристика прочностных свойств тугопластичной каолиновой глины по результатам испытаний по схеме недренированного сдвига

Характеристика прочностных свойств		
в тотальных напряжениях		
$\varphi = 13^\circ$	$\text{tg}\varphi = 0.23$	$C = 42 \text{ кПа}$
в эффективных напряжениях		
$\varphi = 15^\circ$	$\text{tg}\varphi = 0.26$	$C = 42 \text{ кПа}$
в реальных эффективных напряжениях		
$\varphi = 15^\circ$	$\text{tg}\varphi = 0.26$	$C = 21 \text{ кПа}$

грунта, что и сказывается на более низких значениях сцепления, характеризующих, в первую очередь, именно структурную устойчивость грунтов.

ВЫВОДЫ

Основные итоги проведенных исследований могут быть сформулированы в следующих положениях.

Общепринятые в современной практике методы, базирующиеся на теории прочности Мора–Кулона и теории эффективных напряжений Терцаги, не могут полностью охарактеризовать прочность глинистых грунтов, так как учитывают лишь внешние воздействия на грунт и не рассматривают реакцию глинистых грунтов на эти воздействия – процессы изменения микроструктуры, происходящие при этом в них.

Важнейшим показателем, отражающим внутренние напряжения на контактах в глинистых грунтах, является величина расклинивающего давления гидратных пленок минеральных частиц.

Величина расклинивающего давления гидратных пленок зависит от строения самих пленок и закономерно снижается по мере роста толщины пленки и возрастании роли в ее строении β -пленки при увеличении влажности грунта.

Численное значение величины расклинивающего давления гидратных пленок может быть определено как разница между величиной давления набухания и порового давления при гидратации грунта.

Величина расклинивающего давления гидратных пленок должна учитываться при определении прочностных характеристик глинистых грунтов. При разрушении глинистого грунта расклинивающее давление гидратных пленок оказывает влияние на величину касательного напряжения, при котором происходит разрушение, поэтому значение этого давления должно вычитаться из значения касательного напряжения при экспериментальных определениях прочности глин.

Учет влияния расклинивающего действия гидратных пленок при практических испытаниях

глинистых грунтов позволяет определять показатели реальной эффективной прочности грунта, характеризующие не только уровень внешних воздействий на грунт, но и напряженное состояние на контактах слагающих его минеральных частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дерягин Б.В. Сольватные слои как особые граничные фазы // Труды Всесоюз. конф. по коллоидной химии. Киев: Изд-во АН УССР, 1952. С. 3–264.
2. Дерягин Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. М.: Наука, 1986. 205 с.
3. Дерягин Б.В. Что такое трение. М.: АН СССР, 1963. 232 с.
4. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Смачивающие пленки. М.: Наука, 1984. 137 с.
5. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 399 с.
6. Осипов В.И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: МГУ. 1979. 232 с.
7. Осипов В.И. Нанопленки адсорбированной воды в глинах, механизм их образования и свойства // Геоэкология. 2011. № 4. С. 291–305.
8. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИГЭ РАН, ИФЗ РАН, 2012. 74 с.
9. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
10. Ребиндер П.А. Структурно-механические свойства глинистых пород и современные представления физико-химии коллоидов // Труды совещ. по инж.-геол. свойствам горн. пород. М.: АН СССР. 1957. Т. 1. С. 31–44.
11. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика – новая область наук. М.: Знание, 1958. 63 с.
12. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур // Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966. С. 3–16.
13. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 384 с.
14. Терцаги К. Строительная механика грунтов. М.: Госстройиздат, 1933. 392 с.
15. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. М.: Госстройиздат, 1958. 608 с.
16. Терцаги К. Теория механики грунтов. М.: Госстройиздат, 1961. 507 с.
17. Mitchell J.K., Soga K. Fundamentals of Soil Behavior. Third edition. Jon Willey and Sons Inc., 2005. 558 p.
18. Skempton A.W. Significance of Terzaghi's concept of effective stress // L. Bjerrum, A. Casagrande, R. Peck and A.W. Skempton (Eds.). From Theory to Practice in Soil Mechanics. New York: Wiley, 1960. P. 43–53.

EFFECT OF DISJOINING PRESSURE OF HYDRATED FILMS ON THE STRENGTH PROPERTIES OF CLAY

F. S. Karpenko^{a,#}, V. N. Kutergin^a, and R. G. Kalberginov^a^aSergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science, Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia[#]E-mail: kafs08@bk.ru

The article considers the effect of disjoining pressure of hydrate films enveloping mineral particles on the strength properties of clay. A method for determining the value of the disjoining pressure of hydrate films is proposed. The regularities of its variation were studied depending on the moisture content in clays on the basis of experimental studies. The reaction to the external stress of adsorption (α) and diffusive (β) layers of hydrate films is described for different types of structural contacts and the nature of friction at the contacts. The effect of disjoining pressure of hydrate films on the shear stress is shown. The methodology for determining the actual effective strength of clay soils has been developed. This methodology permits us to evaluate not only the external impacts on clay soil, but also the stress at its structural contacts.

Key words: clay soils, microstructure, structural contacts, α - and β -layers of hydrate films, disjoining pressure of hydrate films, internal stress of soil, swelling pressure, actual effective stresses

REFERENCES

1. Deryagin, B.V. *Sol'vatnye sloi kak osoby granichnye fazy* [Solvate layers as special boundary phases]. *Trudy Vsesoyuznoi konferentsii po kolloidnoi khimii* [Proc. All-Union Conf. on Colloid Chemistry]. Kiev, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR Publ., 1952, pp. 3–264. (in Russian).
2. Deryagin, B.V. *Teoriya ustoichivosti kolloidov i tonkikh plenok* [The theory of stability of colloids and thin films]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 205 p. (in Russian).
3. Deryagin, B.V. *Chto takoe trenie* [What is friction]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1963, 232 p. (in Russian).

4. Deryagin, B.V., Churaev, N.V. *Smachivayushchie plenki* [Wetting films]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 137 p. (in Russian).
5. Deryagin, B.V., Churaev, N.V., Muller, V.M. *Poverkhnostnye sily* [Surface forces]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 399 p. (in Russian).
6. Osipov, V.I. *Priroda prochnostnykh i deformatsionnykh svoystv glinistykh porod* [Nature of the strength and deformation properties of clay soils]. Moscow Univ. Publ., 1979, 232 p. (in Russian).
7. Osipov, V.I. *Nanoplenki adsorbirovannoi vody v glinakh, mekhanizm ikh obrazovaniya i svoystva* [Nanofilms of adsorbed water in clays, the mechanism of their formation and properties]. *Geoekologiya*, 2011, no. 4, pp. 291–305. (in Russian).
8. Osipov, V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh* [Physicochemical theory of effective stresses in soils]. Moscow, 2012, 74 p. (in Russian).
9. 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).
10. Rebinder, P.A. *Strukturno-mekhanicheskie svoystva glinistykh porod i sovremennye predstavleniya fiziko-khimii kolloidov* [Structural and mechanical properties of clays and modern representations of physicochemistry of colloids]. *Trudy soveshch. po inzh.-geol. svoystvam gorn. porod* [Proc. meeting on engineering geological properties of rocks]. Moscow, USSR Academy of Sciences, 1957, vol. 1, pp. 31–44. (in Russian).
11. Rebinder, P.A. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika – novaya oblast nauk* [Physicochemical mechanics is a new field of science]. Moscow, Znanie Publ., 1958. 63 p. (in Russian).
12. Rebinder, P.A. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika dispersnykh struktur* [Physico-chemical mechanics of fine structures]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika dispersnykh struktur*. Moscow, Nauka Publ., 1966, pp. 3–16. (in Russian).
13. Rebinder, P.A. *Izbrannye trudy. Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Fiziko-khimicheskaya mekhanika* [Selected works. Surface phenomena in fine systems. Physicochemical mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 384 p. (in Russian).
14. Terzaghi, K. *Stroitel'naya mekhanika gruntov* [Engineering mechanics of soils and rocks]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1933, 392 p. (in Russian).
15. Terzaghi, K., Pek, R. *Mekhanika gruntov v inzhenernoi praktike* [Soil mechanics in engineering practice]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1958, 608 p. (in Russian).
16. Terzaghi, K. *Teoriya mekhaniki gruntov* [Theory of Soil Mechanics]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1961, 507 p. (in Russian).
17. Mitchell, J.K., Soga, K. *Fundamentals of soil behavior*. Third edition. Jon Willey and Sons Inc., 2005, 558 p.
18. Skempton, A.W. *Significance of Terzaghi's concept of effective stress*. L. Bjerrum, A. Casagrande, R. Peck and A.W. Skempton (Eds.). *From Theory to Practice in Soil Mechanics*. New York, Wiley, 1960, pp. 43–53.