
**ГРУНТОВЕДЕНИЕ
И МЕХАНИКА ГРУНТОВ**

УДК 624.131.4

**ВЛИЯНИЕ КАПИЛЛЯРНЫХ СИЛ НА ПРОЧНОСТЬ
ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ**

© 2021 г. Ф. С. Карпенко^{1,*}, В. Н. Кутергин¹, С. И. Фролов¹, О. В. Сереброва¹

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

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

Поступила в редакцию 07.06.2021 г.

После доработки 09.08.2021 г.

Принята к публикации 31.08.2021 г.

Капиллярные силы действуют в не полностью водонасыщенных глинистых грунтах и влияют на их прочностные свойства. В работе рассматриваются результаты практических исследований изменения величины капиллярных сжимающих сил в различных разновидностях глинистых грунтов в зависимости от их степени водонасыщения. Проведенные исследования базируются на положениях физико-химической теории прочности. Показано, что величина капиллярных сжимающих сил в глинистых грунтах зависит от их структурного строения, преобладающего типа структурных контактов, количества глинистых частиц и контактов между ними, и закономерно меняется при изменении степени водонасыщения грунта.

Ключевые слова: *глинистые грунты, структурные контакты, общие эффективные напряжения, реальные эффективные напряжения, капиллярные мениски, капиллярные сжимающие силы*

DOI: 10.31857/S0869780921060023

ВВЕДЕНИЕ

С позиций современной физико-химической теории прочности, глинистые грунты рассматриваются как дисперсные системы. Образование дисперсных глинистых систем происходит в результате взаимодействия частиц глинистых минералов и гидратных пленок вокруг них и формирования контактов между частицами, на которых концентрируются внешние нагрузки, передаваемые на грунт. Силы взаимодействия между частицами, расклинивающее давление гидратных пленок и сжимающие капиллярные силы, проявляющиеся в неводонасыщенных грунтах, суммарно определяют общую эффективную прочность глинистого грунта – напряжение, при достижении которого на контактах происходит разрушение структурных связей между ними.

Силы взаимодействия между минеральными частицами глинистых грунтов и закономерности изменения давления гидратных пленок уже были рассмотрены авторами ранее [2, 4].

Цель настоящей работы – исследование действия капиллярных сил и закономерностей изменения их величины в зависимости от строения и состояния неводонасыщенных глинистых грунтов для общей оценки их прочностных свойств.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕЙСТВИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ СИЛ В СВЯЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТАХ

Современные представления о действии капиллярных сил в грунтах в значительной степени базируются на положениях теории капиллярности П. Лапласа (Pierre-Simon de Laplace) и сформулированном им же законе капиллярного давления. Значительный вклад в развитие представлений о действии капиллярных сил в дисперсных системах внесли исследования А.Н. Фрумкина, П.А. Ребиндера, Б.В. Дерягина и других ученых.

Капиллярные силы действуют в трехфазных системах, в строении которых, наряду с минеральными частицами и водой, участвует воздух. В основе действия капиллярных сил лежит явление смачивания, сущность которого заключается в образовании капиллярных менисков в результате искривления поверхности жидкости и соответствующего изменения ее поверхностного натяжения. При влажности грунтов, близкой к максимальной гигроскопической, мениски формируются на контактах слагающих их частиц, это так называемые мениски углов пор. Увеличение содержания воды в грунтах приводит к ее постепенному подъему по системе капиллярных пор и их заполнению, в результате чего мениски углов пор исчезают, и образование менисков происходит на контакте воды с воздухом по всей площади

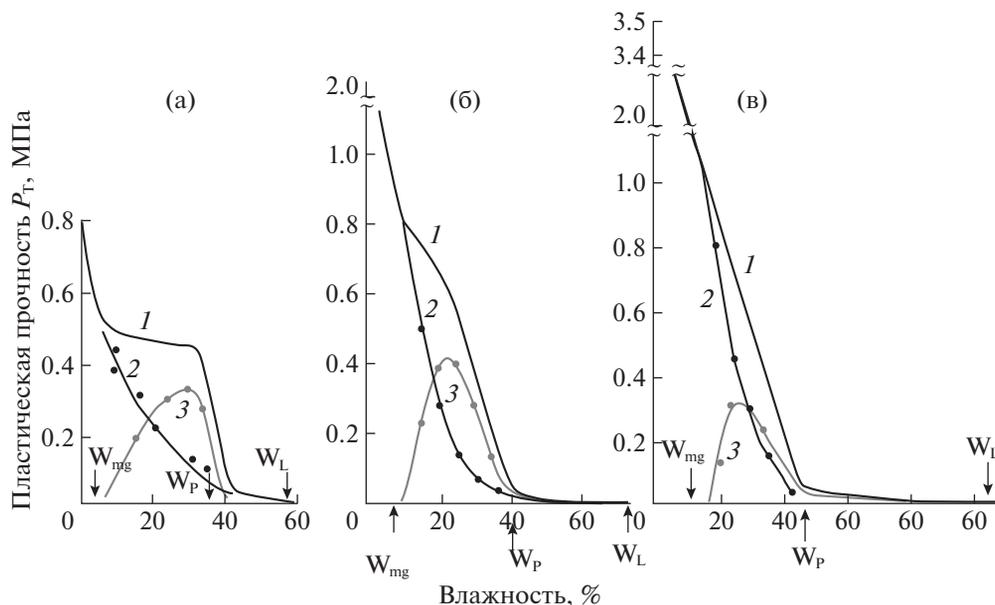


Рис. 1. Зависимость пластической прочности от влажности для каолинита (а), гидрослюда (б) и монтмориллонита (в). Кривые: 1 – экспериментальная; 2 – расчетная; 3 – изменения капиллярных сил от влажности [6].

капиллярных пор. Действие менисков капиллярных пор передается на минеральный скелет грунта, увеличивая величину напряжений в нем, поэтому оно получило название капиллярных стягивающих сил.

Несмотря на то что, как уже было отмечено выше, капиллярные силы действуют во всех не полностью водонасыщенных грунтах, в практических грунтоведческих исследованиях глинистые грунты со степенью водонасыщения (S_r), превышающей 0.8, обычно рассматриваются как полностью водонасыщенные, считается, что действие капиллярных сил в них отсутствует или незначительно и не оказывает существенного влияния на свойства самих грунтов.

Наиболее полные исследования влияния капиллярных стягивающих сил на прочность структурных связей глин были проведены В.Н. Соколовым и В.И. Осиповым [8, 9]. Проведенные ими экспериментальные исследования, результаты которых представлены на рис. 1, позволили установить зависимость пластической прочности глин различного состава (P) от их влажности (кривая 1), охарактеризовать величину капиллярных стягивающих сил (кривая 3), определяемую как разницу экспериментальных значений и расчетных значений ее величины при условии отсутствия капиллярных сил (кривая 2), и таким образом оценить влияние капиллярных сил на пластическую прочность глин. Эти исследования дают общую характеристику действия капиллярных сил в глинах и определить закономерности изменения силы их действия в зависимости от со-

держания влаги в интервалах влажности от максимальной гигроскопической до значений, превышающих предел пластичности. Полученные ими результаты подтверждают, что капиллярные силы оказывают существенное влияние на пластическую прочность глин, а их величина может достигать значений в 0.29–0.42 МПа.

Приведенные данные позволяют говорить, что действие капиллярных сил вносит свой вклад в общее напряженное состояние глинистых грунтов, следовательно, должно учитываться при определении их прочностных свойств. Характер, величина и закономерности этого действия требуют специального изучения, и в наибольшей степени это относится к не полностью водонасыщенным глинистым грунтам, степень заполнения пор водой в которых превышает 70%. Именно грунты с такими характеристиками внутреннего строения наиболее часто становятся объектом изучения при проведении инженерно-геологических изысканий, и для них эти данные имеют наибольшее практическое значение. Исследования указанных вопросов проводились с позиций физико-химической теории прочности дисперсных грунтов.

СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ И СВОЙСТВАХ СВЯЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ

В основе современных научных представлений о строении глин лежит рассмотрение их как дисперсных систем, сложенных минеральными

частицами глинистых минералов дисперсной фазы и водой – дисперсионной средой. Эти суждения базируются на фундаментальных положениях теории ДЛФО, двойного электрического слоя (ДЭС), теории контактных взаимодействий П.А. Ребиндера, теории расклинивающего действия гидратных пленок Б.В. Дерягина и обобщающей их физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах, разработанной В.И. Осиповым [5], В.И. Осиповым и В.Н. Соколовым [6] применительно к глинистым породам. Генезис глин и формирование их микроструктуры происходят в результате образования структурных связей за счет действия сил притяжения и отталкивания между частицами и взаимодействия с водой в ходе литогенеза.

Прочность структурных элементов глинистых грунтов рассматривалась М.М. Филатовым [10], Е.М. Сергеевым [7], В.Д. Ломтадзе [1]. Проведенные ими опытные исследования показали, что прочность частиц глинистых минералов чрезвычайно высока, и они практически не разрушаются даже под действием огромного давления, превышающего возможные нагрузки от инженерных сооружений, т.е. прочность глинистых систем определяется именно прочностью структурных связей. По природе действующих сил они могут быть физическими, физико-химическими и химическими.

Основную роль в строении и свойствах связанных дисперсных грунтов играют физико-химические структурные связи, формирующиеся в результате действия молекулярных, ионно-электростатических сил, расклинивающего действия гидратных пленок и капиллярных сил. В процессе коагуляции и седиментации высокодисперсных систем, таких как слабосцементированные глины и илы, на их формирование оказывают значительное влияние молекулярные силы (называемые также Ван-дер-Ваальсовы). Ионно-электростатические силы действуют при электростатическом притяжении отрицательно заряженных частиц и расположенных между ними катионов. При сближении минеральных частиц, окруженных ДЭС, происходит перекрытие их диффузных слоев, и возникает электростатическое взаимодействие одноименно заряженных ионов адсорбционных и диффузных слоев.

Действие структурных сил гидратных пленок также проявляется при сближении частиц и перекрытии их ДЭС. При этом происходит поджатие пленок, в результате чего часть воды теряет связь с частицами в зоне их контакта и переходит в свободную фазу. Особая структура воды в зоне перекрытия разрушается, что сопровождается изменением ее энергетического состояния и возникновением отталкивающих сил между частицами. Это явление было открыто и изучалось Б.В. Деря-

гиным и представителями его научной школы, и получило название расклинивающего действия гидратных пленок. Расклинивающее давление возникает в результате суммарного действия сил притяжения и отталкивания между частицами. Его величина зависит от степени перекрытия гидратных пленок взаимодействующих частиц и может быть как положительной, так и отрицательной.

В результате взаимодействия частиц и их гидратных пленок происходит образование структурных контактов между минеральными частицами. Площадки контактов являются зонами, на которых концентрируются напряжения, передаваемые на грунт. В дисперсных глинистых грунтах различаются три типа контактов – дальний коагуляционный, ближний коагуляционный и переходный точечный, которые формируются на определенной стадии литогенеза. Каждый из типов контактов имеет свою предельную прочность, определяемую силой взаимодействия между частицами, реальной эффективной прочностью σ'' , и расклинивающим действием гидратных пленок $\Pi_{(h)}$. Преобладание того или иного типа контактов в структуре глинистых пород определяет их физико-химическое состояние (соответственно, текучее, пластичное или твердое), строение и свойства.

Величина σ'' зависит от общего эффективного напряжения в грунте σ' , представляющего собой разницу общего внешнего напряжения на грунт и величины порового давления в нем, количества и площади контактов, расклинивающего действия гидратных пленок и действия капиллярных сжимающих сил [5, 6]:

$$\sigma'' = (\sigma - U) - \chi \Pi_{(h)} a_c - F,$$

где σ – общее внешнее напряжение; U – поровое давление; χ – число контактов в единице площади; $\Pi_{(h)}$ – расклинивающее давление гидратных пленок; a_c – площадь единичного контакта; F – величина капиллярных сжимающих сил.

Реальная эффективная прочность глинистого грунта (действие молекулярных и ионно-электростатических сил взаимодействия между минеральными частицами) является постоянной величиной, характерной для каждого грунта. Она определяется типом контакта и минеральным составом частиц и остается неизменной вне зависимости от условий, в которых находится грунт. Величина расклинивающего давления гидратных пленок также зависит от типа контакта и минерального состава частиц, но при этом изменяется в зависимости от температурных условий и напряженного состояния, в которых находится глинистый грунт. Эти данные послужили основой для практического исследования закономерностей действия капиллярных сил в грунтах.

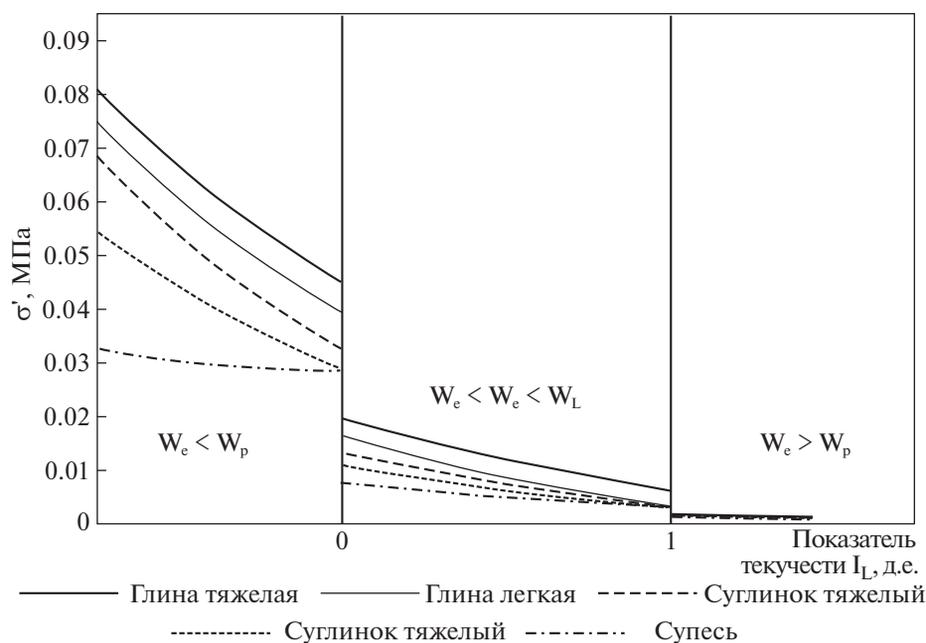


Рис. 2. Зависимость общей эффективной прочности σ' глинистых грунтов от содержания в них влаги [3].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При исследовании действия капиллярных сил авторами применялась методика определения общих и реальных эффективных напряжений, разработанная и успешно апробированная ранее при выполнении предыдущих работ. Подробно методика и результаты определения на ее основе общих и реальных эффективных напряжений для разновидностей глинистых грунтов описаны авторами в работах [3, 4]. Сущность этой методики заключается в том, что испытания грунтов проводятся в условиях, при которых воздействие внешних нагрузок производится только на сами контакты, и дополнительного расхода энергии на изменение объема испытываемого грунта, его уплотнение, разрушение, разрыв сплошности и т.п. не происходит, а все нагрузки, возникающие в грунте при испытании, равномерно распределяются во всей зоне их действия.

Таким условиям наилучшим образом соответствуют условия испытаний по методу чистого сдвига (скашивания), позволяющего определять величину сдвигающей нагрузки при отсутствии изменения объема грунта. В этом случае не происходит нарушения сплошности грунта и перемещения одной его части относительно другой, а деформация происходит только за счет перемещения частиц дисперсной фазы относительно друг друга при изменении формы образца. Образец грунта естественного сложения или модельного грунта помещается в прибор скашивания; после чего проводится испытание в недренированных условиях с постоянной скоростью деформирования при заданной нормальной нагрузке.

На основе полученных данных расчетным путем определяют общее предельное эффективное напряжение σ' , равное сумме касательного (τ) и нормального (σ_1) напряжений в момент разрушения структурных связей в образце за вычетом порового давления (U). По результатам испытаний рассчитывается реальная эффективная прочность σ'' каждой исследованной разновидности грунта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Общая эффективная прочность σ' глинистого грунта складывается из суммарной прочности индивидуальных контактов, их реальной эффективной прочности σ'' , величины расклинивающего действия гидратных пленок $\Pi_{(h)}$ и капиллярных стягивающих сил F . Характеристика величины σ' , полученная авторами ранее [3] для полностью водонасыщенных грунтов, в которых капиллярные силы не действуют, показана на рис. 2.

Для оценки действия капиллярных сил F и определения закономерностей его изменений были проведены экспериментальные исследования общей эффективной прочности не полностью водонасыщенных грунтов со степенью водонасыщения $S_r > 0.75$. Исследования проводились на модельных образцах глинистых грунтов минеральных глин сапонитового, монтмориллонитового, каолинитового состава и разновидностей глинистых моренных грунтов Московского региона ($g\Pi ms$) преимущественно иллитового и, в меньшей степени, каолинитового состава раз-

Таблица 1. Величина сжимающих капиллярных сил в разновидностях глинистых грунтов

Твердые грунты с преобладающим точечным переходным типом контактов ($I_L < 0$)								
Разновидность грунта	Величина сжимающих капиллярных сил в единичном объеме грунта [Н], при степени водонасыщения (Sr)							Среднее реальное эффективное напряжение в единичном объеме грунта, [Н]
	0.75	0.80	0.83	0.86	0.90	0.95	0.98	
глина сапонитовая (Sp)	1.176	1.172	1.155	1.120	0.990	0.564	0.260	1.689
глина монтмориллонитовая (Mnt)	1.010	0.985	0.941	0.850	0.639	0.354	0.195	1.504
глина каолиновая (Kl)	0.946	0.928	0.865	0.780	0.583	0.280	0.147	1.273
глина легкая (gIIms)	0.917	0.880	0.820	0.730	0.469		0.077	1.146
суглинок тяжелый (gIIms)	0.841	0.800	0.740	0.640	0.432		0.040	1.022
суглинок легкий (gIIms)	0.693	0.650	0.600	0.520	0.308	0.200	0.034	0.906
Пластичные грунты с преобладающим ближним коагуляционным типом контактов ($0 < I_L < 1$)								
Разновидность грунта	Величина сжимающих капиллярных сил в единичном объеме грунта [Н], при степени водонасыщения (Sr)							Среднее реальное эффективное напряжение в единичном объеме грунта, [Н]
	0.75	0.80	0.83	0.86	0.90	0.95	0.98	
глина сапонитовая (Sp)	0.256	0.250	0.245	0.232	0.200	0.130	0.060	0.418
глина монтмориллонитовая (Mnt)	0.230	0.230	0.215	0.200	0.170	0.100	0.050	0.386
глина каолиновая (Kl)	0.200	0.190	0.180	0.170	0.130	0.080	0.035	0.344
глина легкая (gIIms)	0.180	0.170	0.158	0.145	0.120	0.070	0.030	0.283
суглинок тяжелый (gIIms)	0.150	0.140	0.130	0.120	0.100	0.060	0.025	0.221
суглинок легкий (gIIms)	0.120	0.120	0.110	0.100	0.090	0.050	0.020	0.185
Текучие грунты с преобладающим дальним коагуляционным типом контактов ($I_L > 1$)								
Разновидность грунта	Величина сжимающих капиллярных сил в единичном объеме грунта [Н], при степени водонасыщения (Sr)							Среднее реальное эффективное напряжение в единичном объеме грунта, [Н]
	0.75	0.80	0.83	0.86	0.90	0.95	0.98	
глина сапонитовая (Sp)	0.026	0.026	0.025	0.024	0.018	0.010	0.005	0.088
глина монтмориллонитовая (Mnt)	0.019	0.018	0.017	0.016	0.014	0.008	0.004	0.070
глина каолиновая (Kl)	0.012	0.012	0.011	0.010	0.009	0.007	0.004	0.048
глина легкая (gIIms)	0.010	0.010	0.010	0.009	0.008	0.006	0.003	0.031
суглинок тяжелый (gIIms)	0.009	0.009	0.008	0.008	0.007	0.005	0.003	0.029
суглинок легкий (gIIms)	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005	0.004	0.002	0.027

личной консистенции (I_L) и степени водонасыщения, изменявшейся от 75 до 98% в условиях, при которых глинистый грунт в общей практике грунтоведческих исследований рассматривается, как полностью водонасыщенный. Результаты проведенных исследований приведены в табл. 1 и показаны на рис. 3 и 4.

Полученные данные показывают, что капиллярные сжимающие силы действуют во всех не полностью водонасыщенных глинистых грунтах.

Сила их действия зависит не только от степени заполнения порового пространства грунта водой, но также и от преобладающего типа контактов между минеральными частицами грунта и их количества.

Независимо от разновидности, величина капиллярных сжимающих сил в глинистых грунтах зависит от степени заполнения пор водой, т.е. от количества капиллярных менисков (см. рис. 3). Наибольшие значения она имеет при степени водонасыщения грунта $Sr = 0.75-0.85$, по мере уве-

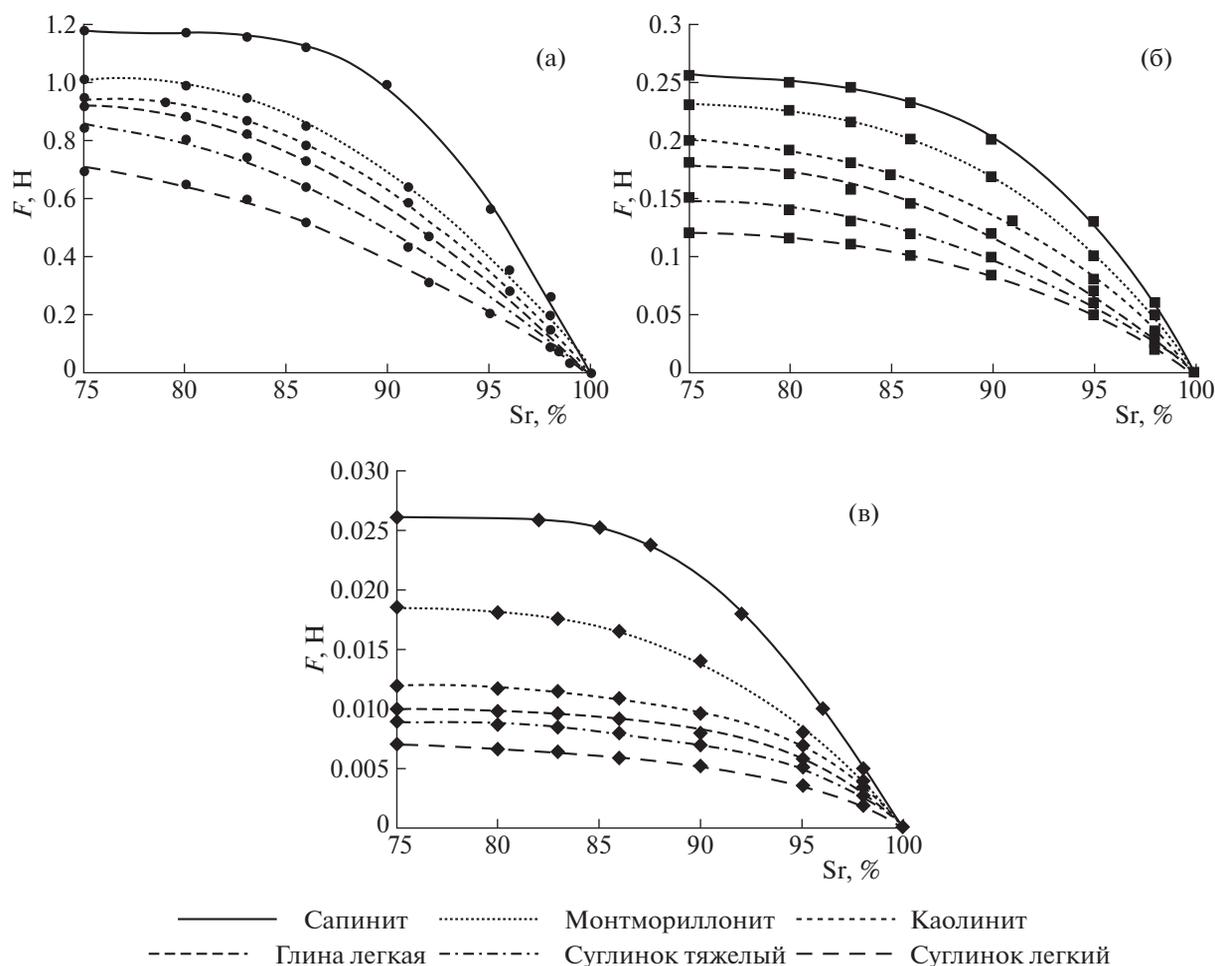


Рис. 3. Зависимость величины капиллярных сжимающих сил F в единичном объеме грунта от степени водонасыщения S_r грунтов: а – твердые грунты; б – пластичные грунты; в – текучие грунты.

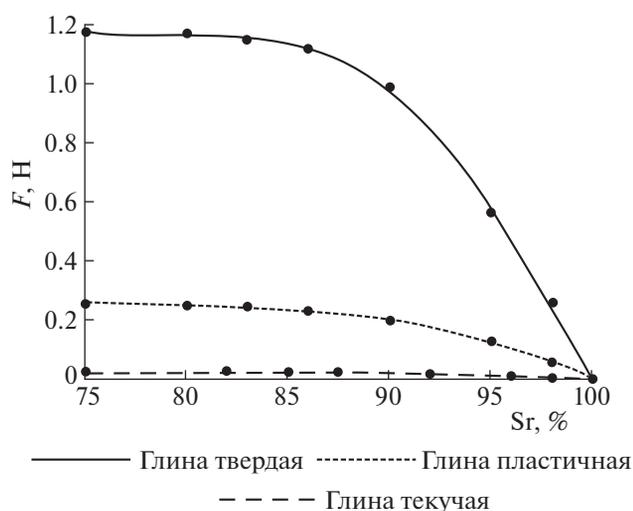


Рис. 4. Зависимость величины капиллярных сжимающих сил F в единичном объеме грунта от физико-химического состояния и степени водонасыщения S_r грунтов.

личения влажности и уменьшения содержания воздуха в порах грунта ($S_r = 0.90-0.95$) происходит ее снижение, и при полном водонасыщении грунта действие капиллярных сил прекращается.

Величина капиллярных сжимающих сил увеличивается в ряду легкий суглинок – тяжелый суглинок – легкая глина – тяжелая глина, т.е. соответственно увеличению числа глинистых частиц в грунтах и контактов между ними (см. рис. 3). Это показывает, что действие капиллярных сил, как и других нагрузок, передается непосредственно на контакты частиц глинистых грунтов, тем самым оказывая влияние на их общую эффективную прочность.

Преобладающий тип контактов в глинистых грунтах определяет их структурное строение и физико-химическое состояние, характеризуемое показателем текучести I_L [3]. Каждый тип контактов имеет свою прочность, резко уменьшающуюся при переходе от точечных переходных (твердые грунты) к ближним (пластичные грунты) и

дальним коагуляционным (текучие грунты) контактам. Аналогичным образом происходит и изменение величины капиллярных сжимающих сил, резко снижающейся при переходе от преобладающего точечного переходного типа контактов к ближнему и дальнему коагуляционному (см. рис. 4).

Оценку степени влияния капиллярных сжимающих сил на прочностные свойства глинистых грунтов может дать сравнительный анализ полученных данных и сил взаимодействия между частицами этих грунтов, основной составляющей их общей эффективной прочности, исследование которых было проведено авторами ранее [4]. Результаты определения силы взаимодействия между частицами грунтов на контактах, называемой реальным эффективным напряжением, выполненные для тех же грунтов, что и в данной работе, приведены в табл. 1. Анализ представленных данных показывает, что действие капиллярных сжимающих сил может оказывать существенное влияние на общую эффективную прочность глинистых грунтов, их величина при степени водонасыщения грунтов $S_r = 0.75-0.80$ достигает значений, сопоставимых с величиной реальных эффективных напряжений для всех разновидностей грунтов, независимо от их физико-химического состояния.

В целом, действие капиллярных сжимающих сил в глинистых грунтах повышает их общую эффективную прочность, что, как было показано авторами ранее [4], приводит к изменению показателей их прочностных свойств, определенных по закону Мора–Кулона, а именно увеличению значений сцепления.

ВЫВОДЫ

Капиллярные силы в той или иной степени действуют в грунтах, в составе которых, наряду с минеральными частицами и водой, присутствует газовая составляющая, воздух, за счет образования капиллярных менисков воды в поровом пространстве на ее границе с газом в результате искривления поверхности жидкости и изменения ее поверхностного натяжения. Величина капиллярных сжимающих сил не постоянна и изменяется в зависимости от строения грунта. Для глинистых грунтов закономерности изменения этой величины имеют двойственную природу.

С одной стороны, величина капиллярных сил, в соответствии с положениями теории капиллярности, определяется количеством капиллярных менисков в порах грунта, зависящем от степени заполнения водой последних, которая характеризуется показателем степени водонасыщения грунта.

В то же время, глинистые грунты по своему строению являются дисперсными системами. Соответственно, характер действия капиллярных сил, являющихся одной из составляющих суммарных внутренних напряжений в глинах, зависит от физико-химических параметров, определяющих строение и свойства дисперсных систем – преобладающим типом контактов между минеральными частицами грунта и их количеством.

Действие капиллярных сжимающих сил в глинистых грунтах повышает их общую эффективную прочность, что, соответственно, приводит к увеличению показателей прочностных свойств (сцепления). Влияние капиллярных сил на прочностные свойства глинистых грунтов может быть существенным, сила их действия обратно пропорциональна объему заполнения пор грунта водой и при степени водонасыщения $0.75-0.8$ достигает значений, сопоставимых с силой взаимодействия между частицами на контактах.

Капиллярные сжимающие силы оказывают влияние на прочностные свойства глинистых грунтов и степень этого влияния может меняться при изменении их структурного строения в различных условиях нагрузок и деформаций – уплотнения, водонасыщения или других процессов и воздействий.

Действие капиллярных сил необходимо рассматривать при проведении практических исследований для объективной оценки прочностных свойств глинистых грунтов и достоверного прогноза возможности их изменения в результате различных природных и техногенных воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломтадзе В.Д. Изменение состава, структуры, плотности и связности глин при уплотнении их большими нагрузками // Тр. лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР. 1955. Т. 12.
2. 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.
3. Карпенко Ф.С. Физико-химическая природа пределов пластичности глинистых грунтов // Геоэкология. 2018. № 5. С. 66–72.
4. Карпенко Ф.С. Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // Геоэкология. 2019. № 5. С. 48–60.
5. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИГЭ РАН, 2012. 74 с.
6. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
7. Сергеев Е.М. К вопросу о механической прочности дисперсных грунтов // Уч. зап. МГУ. 1949. № 10.

8. Соколов В.Н. Влияние влажности на прочность структурных связей глинистых частиц // Вестн. МГУ. Сер. геол. 1973. № 6. С. 100–104.
9. Соколов В.Н., Осипов В.И. Влияние различных категорий связанной воды на прочность глин // Свя-
званная вода в дисперсных системах. Вып. 4. М.: МГУ, 1977. С. 4–15.
10. Филатов М.М. О микроструктуре грунтов в связи с деформациями их под влиянием нагрузки // Физика почв СССР. Тр. Сов. секции Международной ассоциации почвоведов. Т. 5. 1936.

THE INFLUENCE OF CAPILLARY FORCES ON THE STRENGTH OF CLAY SOILS

F. S. Karpenko^{a, #}, V. N. Kutergin^a, S. I. Frolov^a, and O. V. Serebrova^a

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

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

Capillary forces operating in incompletely water-saturated clay soils appear to be an important agent affecting their strength properties. The paper considers the results of practical studies in the changing value of capillary compressive forces in clay soil varieties depending on their water saturation degree. Investigations are based on the physicochemical strength theory. It is shown that the value of capillary compressive forces in clays depends on their structure, the prevailing type of structural contacts, the number of clay particles and contacts between them. This value is proved to be dependent on the degree of water saturation in soil, changing regularly with the variation of the latter.

Keywords: *clay soils, structural contacts, general effective stresses, actual effective stresses, capillary meniscus, capillary compressive forces*

REFERENCES

1. Lomtadze, V.D. *Izmenenie sostava, struktury, plotnosti i svyaznosti glin pri uplotnenii ikh bol'shimi nagruzkami* [Changes in the composition, structure, density and cohesion of clays compacted under heavy load]. *Trudy laboratorii gidrogeologicheskikh problem AN SSSR*. 1955, vol. 12. (in Russian)
2. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kalbergenov, R.G. *Vliyanie rasklinivayushchego deistviya gidratnykh plenok na prochnostnye svoystva glinistykh gruntov* [Influence of the disjoining effect of hydrate films on the strength properties of clay soils]. *Geoekologiya*, 2018, no. 4, pp. 91–97. (in Russian)
3. Karpenko, F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda predelov plastichnosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil plasticity limits]. *Geoekologiya*, 2018, no. 5, pp. 66–72. (in Russian)
4. Karpenko, F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda prochnosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil strength]. *Geoekologiya*, 2019, no. 5, pp. 48–60. (in Russian)
5. Osipov, V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh* [Physicochemical theory of effective stresses in soils]. Moscow, IFZ RAN. 2012, 74 p. (in Russian)
6. 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)
7. Sergeev, E.M. *K voprosy o mekhanicheskoi prochnosti dispersnykh gruntov* [On the issue of mechanical strength of fine soils]. *Uch. zapiski MGU*, 1949, no. 10.
8. Sokolov, V.N. *Vliyanie vlazhnosti na prochnost' strukturnykh svyazey glinistykh chastits* [Moisture effect on the strength of structural bonds between clay particles]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geolog.* 1973, no. 6, pp. 100–104. (in Russian)
9. Sokolov V.N., Osipov V.I. *Vliyanie razlichnykh kategorii svyazannoi vody na prochnost' glin* [Influence of different categories of bound water on clay strength]. *Svyazannaya voda v dispersnykh sistemakh* [Bound water in disperse systems], Moscow, MGU Publ., 1977, iss. 4, pp. 4–15. (in Russian)
10. Filatov, M.M. *O mikrostrukture gruntov v svyazi s deformatsiyami ikh pod vliyaniem nagruzki* [On the microstructure of soils in connection with their deformations under load]. *Fizika pochv SSSR. Trudy Sov. sektsii Mezhdunarodnoi assotsiatsii pochvedov*. 1936, vol. 5. (in Russian)