

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.4

ВЛИЯНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ИЗМЕНЕНИЙ СВОЙСТВ ГИДРАТНЫХ ПЛЕНОК ПРИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

© 2021 г. Ф. С. Карпенко^{1,*}, В. Н. Кутергин¹, С. И. Фролов¹, Р. В. Собин¹

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 10.09.2020 г.

После доработки 23.09.2020 г.

Принята к публикации 05.10.2020 г.

Изменение прочности грунтов при воздействии температуры оказывает влияние на их устойчивость, безопасность строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Необходимость адаптации к таким изменениям и снижения их неблагоприятного воздействия требует разработки методики достоверного и объективного прогноза изменения прочностных свойств грунтов при различных температурах. Изменение прочностных свойств глинистых грунтов при температурном воздействии рассмотрено с позиций физико-химической механики. Показано, что реакция связанных дисперсных грунтов на температурное воздействие определяется свойствами гидратных пленок минеральных частиц, слагающих грунт. При флуктуациях температуры вода гидратных пленок может терять связь с частицами и переходить в свободную воду. Изменение толщины гидратных пленок вызывает изменение величины их расклинивающего давления, нарушая баланс сил взаимодействия частиц, что оказывает влияние на прочность грунта в целом.

Ключевые слова: глинистые грунты, структурные контакты, гидратные пленки, α - и β -пленки, расклинивающее давление, общие эффективные напряжения, реальные эффективные напряжения

DOI: 10.31857/S0869780921010033

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 передаваемые на грунт внешние нагрузки. Силы взаимодействия между частицами и расклинивающее давление гидратных пленок при условии полного водонасыщения грунта, т.е. при отсутствии действия капиллярных сил, суммарно определяют общую эффективную прочность глинистого грунта. Величина сил взаимодействия между частицами, называемая реальной эффективной прочностью, определяется минеральным составом частиц и типом контактов между ними и является постоянной для каждого конкретного грунта. В то же время, величина расклинивающего давления гидратных пленок может изменяться, оказывая влияние на прочность дисперсного глинистого грунта в целом. В первую очередь, это происходит при изменении температуры грунта, оказывающей влия-

ние на строение и свойства гидратных пленок частиц.

Влияние температурного фактора на прочность грунтов общепризнано, в практике инженерно-геологических исследований накоплено множество данных, свидетельствующих об этом. Особую актуальность проблема изменения устойчивости грунтов оснований инженерных сооружений приобретает в современных условиях изменения климата. В первую очередь это касается многолетнемерзлых грунтов криолитозоны, изменение устойчивости и несущих свойств которых при повышении температуры приводит к активизации неблагоприятных природных и техногенных процессов. Это газовые выбросы, воронки взрывов, просадки, деформации фундаментов, формирование и развитие криопэгов, обрушение берегов и склонов, солифлюкционные и другие процессы и явления.

Несмотря на свою значимость, влияние температурных условий на изменение прочностных свойств глинистых грунтов остается недостаточно изученным. Причины и закономерности таких изменений не вполне ясны, что затрудняет их прогноз для реальных условий строительства и

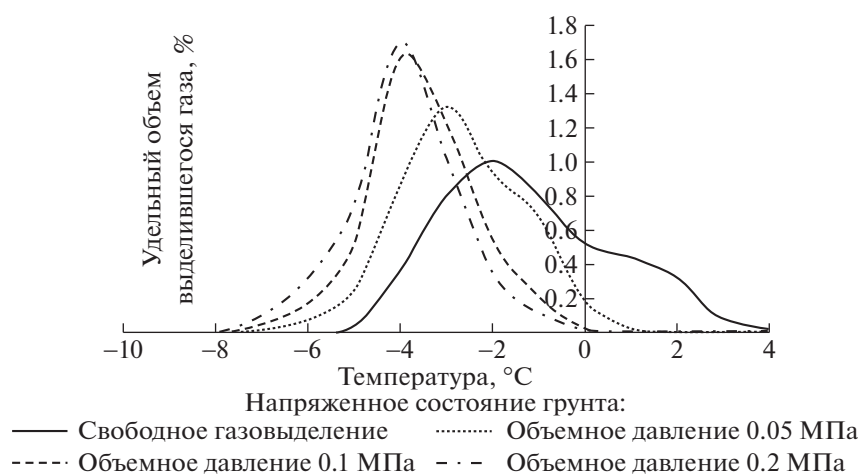


Рис. 1. Зависимость удельного объема выделившегося газа от температуры для суглинков при изменении напряженного состояния грунта.

эксплуатации инженерных сооружений. Важность и актуальность решения этих проблем определяют необходимость рассмотрения их с позиций физико-химической теории, основанной на изучении внутреннего строения глинистых грунтов и позволяющей описать закономерности его формирования и изменения под действием различных, в том числе температурных факторов.

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ ОТ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ

Изменение прочностных свойств глинистых грунтов происходит при флуктуациях температур, как в положительной, так и в отрицательной областях значений. Это подтверждается результатами специальных проведенных экспериментальных испытаний прочности разновидностей глинистых грунтов в различных температурных условиях.

Строение и свойства мерзлых грунтов были изучены и описаны авторами [16, 17] на примере образцов глинистых пород участка южного берега Байдарацкой губы. Испытания проводились на твердых и тугопластичных суглинках при различных температурах. Характерная особенность испытанных грунтов — наличие в них различных форм (растворенные, адсорбированные и свободные) газовых включений [20], содержание которых достигает 4–5%.

Проведенные исследования показали, что повышение температуры мерзлых глинистых грунтов приводит к выделению содержащихся в них газов (рис. 1), что закономерно сопровождается изменением их строения и снижением значений показателей прочностных свойств — угла внут-

реннего трения ϕ и сцепления C (рис. 2). Эти изменения происходят уже при отрицательных температурах в условиях, при которых грунт в целом остается в мерзлом фазовом состоянии, а их интенсивность зависит от напряженного состояния, в котором находится грунт.

Изменение прочностных свойств связных дисперсных грунтов происходит и при воздействии положительных температур. Результаты проведенных испытаний разновидностей глинистых грунтов методом трехосного сжатия и микрорыльчаткой, характерные графики которых приведены на рис. 3 и 4, соответственно, показывают, что повышение температуры приводит к закономерному снижению показателей прочностных свойств глин. Снижение прочности носит неравномерный характер, наиболее интенсивно оно идет в диапазоне температур от 0 до +10°C, до достижения температуры +40...+45°C прочность практически не меняется, а при дальнейшем увеличении температуры до +60°C интенсивность снижения опять возрастает.

Приведенные данные подтверждают высказанное выше положение, что прочность дисперсных связных грунтов зависит от их температуры. Соответственно, температурные условия оказывают влияние на их устойчивость и несущую способность, а, следовательно, на развитие природных процессов и безопасность строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Это влияние проявляется как в области положительных, так и отрицательных температур, что становится особенно актуальным в современных условиях активного освоения арктического региона. Рассмотрение этого вопроса может быть проведено на основе характеристики процессов, происходящих в микроструктурном строении глинистых грунтов при изменении их температуры, исходя

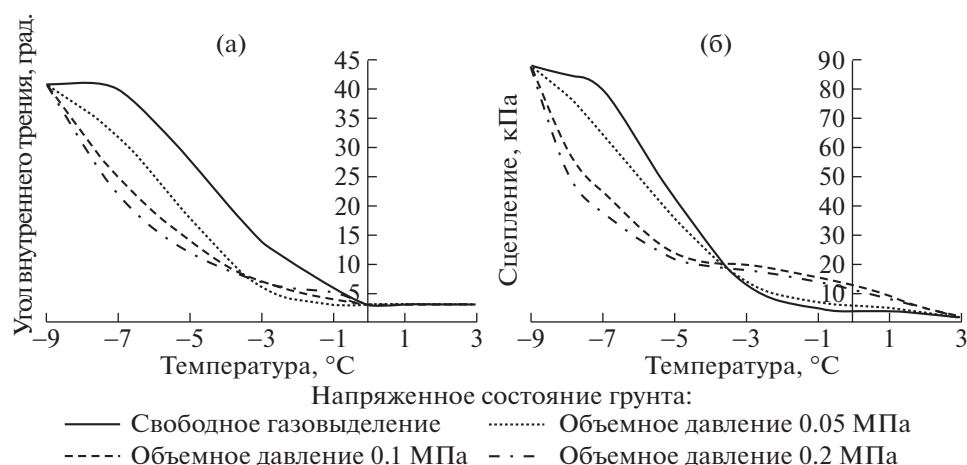


Рис. 2. Изменение прочности суглинков при газовыделении: а — угол внутреннего трения, б — сцепление.

при этом из базовых положений физико-химической теории реальной эффективной прочности дисперсных глинистых грунтов.

СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ГИДРАТНЫХ ПЛЕНОК ЧАСТИЦ ГЛИНИСТЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

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 представления базируются на фундаментальных положениях теории ДЛФО — теории устойчивости дисперсных систем, независимо разработанной Б.В. Дерягиным, Л.Д. Ландау, Э. Фервеем и

Т. Овербеком (E.J. Verway, J.Th.G. Overbeek), двойного электрического слоя (ДЭС), теории контактных взаимодействий П.А. Ребиндера, теории расклинивающего действия Б.В. Дерягина и обобщающей их физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах, разработанной В.И. Осиповым [13], В.И. Осиповым и В.Н. Соколовым [14] в отношении глинистых пород.

Генезис глин и формирование их микроструктуры происходит в результате образования структурных связей за счет действия сил притяжения и отталкивания между частицами и взаимодействия 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 взаимодействия частиц дисперсной фазы.

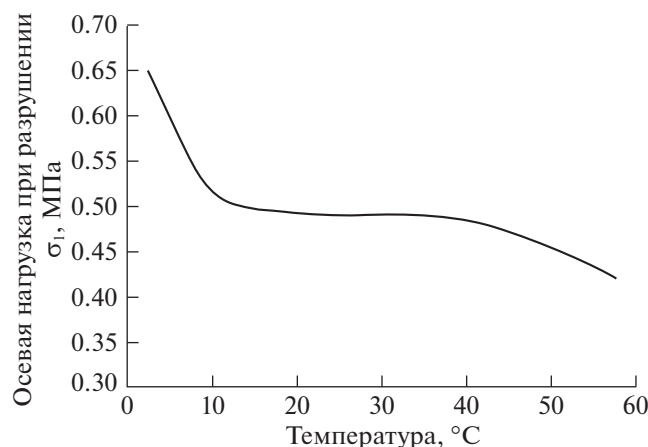


Рис. 3. Зависимость величины осевой нагрузки σ_1 при разрушении легких глин от температуры при испытаниях в условиях трехосного сжатия по консолидировано-недренированной схеме. Объемное давление $\sigma_v = 0.1$ МПа.

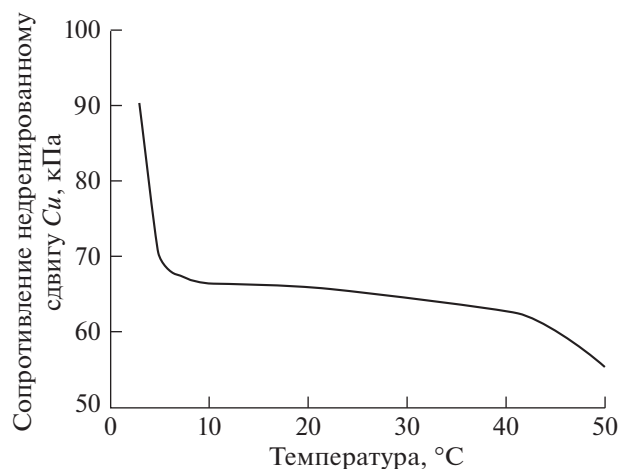


Рис. 4. Зависимость величины сопротивления недренированному сдвигу (C_u) легких глин от температуры при испытаниях микрокрыльчаткой.

Основную роль в строении и свойствах связных дисперсных грунтов играют физико-химические структурные связи, образующиеся на границе минеральных частиц с водой в результате действия молекулярных, ионно-электростатических сил, расклинивающего действия гидратных пленок и капиллярных сил.

Молекулярные силы (называемые также вандер-ваальсовскими) оказывают важнейшее влияние на формирование в процессе коагуляции и седиментации таких высокодисперсных систем, как слабосцементированные глины и илы. Ионно-электростатические силы действуют при электростатическом притяжении отрицательно заряженных частиц и расположенных между ними катионов. При сближении минеральных частиц, окруженных слоем ДЭС, происходит перекрытие их диффузных слоев, и возникает электростатическое взаимодействие одноименно заряженных ионов адсорбционных и диффузных слоев.

Действие структурных сил гидратных пленок 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. Дерягиным [4, 6] 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. В дисперсных глинистых грунтах различают три типа контактов — дальний коагуляционный, ближний коагуляционный и переходный точечный, каждый из которых формируется на определенной стадии литогенеза. Преобладание определенного типа контактов в структуре глинистых пород определяет их физико-химическое состояние (текучее, пластичное или твердое), строение и свойства.

Площадки контактов являются зонами, на которых концентрируются напряжения, передаваемые на грунт. Каждый из типов контактов имеет свою предельную прочность, определяемую силой взаимодействия между частицами и расклинивающим действием гидратных пленок. Эта прочность определяется как реальная эффектив-

ная прочность σ'' . Величина σ'' зависит от общего эффективного давления в грунте σ' , количества и площади контактов и расклинивающего действия гидратных пленок $\Pi(h)$. Прочность контакта зависит от минералогического состава частиц и его типа, определяемого толщиной и свойствами гидратной пленки на поверхности частиц. В условиях, при которых напряжение, передаваемое на площадку контакта, превышает его прочность, происходит разрушение последнего, соответственно, общая реальная эффективная прочность глины определяется суммарной прочностью отдельных контактов.

Таким образом общая эффективная прочность полностью водонасыщенных глин, в которых не действуют капиллярные силы, определяется их реальной эффективной прочностью и расклинивающим давлением гидратных пленок. Реальная эффективная прочность — постоянная величина, характерная для каждого конкретного грунта, определяется типом контакта и минеральным составом частиц и остается неизменной вне зависимости от условий, в которых находится грунт.

Толщина и свойства гидратных пленок, а, следовательно, величина их давления, могут изменяться в зависимости от условий нагружения. Гидратные пленки имеют двухслойное строение и состоят из адсорбционного (α -пленка) и диффузного (β -пленка) слоев. Величина общего давления гидратных пленок складывается, согласно Б.В. Дерягину и Н.В. Чураеву [7], из действия электростатической, молекулярной и структурной составляющих. Толщина и устойчивость β -пленок определяются действием электростатической компоненты расклинивающего давления, поэтому она метастабильна и может в определенных условиях терять связь с минеральными частицами и переходить в свободную воду. Расклинивающее давление β -пленки определяется ее устойчивостью и зависит от ее толщины [8]. График этой зависимости показан на рис. 5.

В отличие от β -пленок, α -пленки более стабильны, хотя их толщина также может изменяться под действием различных факторов. Толщина и устойчивость α -пленок определяются действием молекулярной и структурной компонент расклинивающего давления. Величина давления α -пленок в большей степени, чем для β -пленок, зависит от толщины пленки [7], при этом толщина α -пленок зависит от температуры [9, 15], вид этой зависимости показан на рис. 6.

В целом, величина давления гидратных пленок, как β -пленок, так и α -пленок, определяется их толщиной. Действие температуры оказывает влияние на толщину пленок и, следовательно, величину расклинивающего давления. При изменении температуры вода гидратных пленок может терять связь с минеральными частицами и пере-

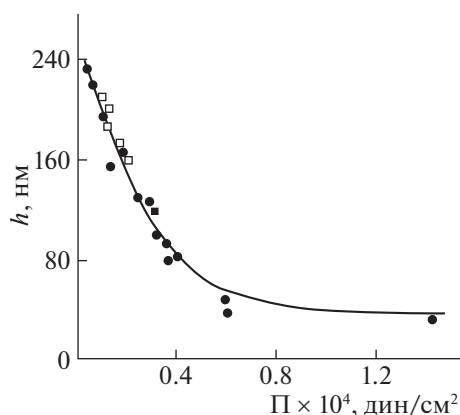


Рис. 5. Изотерма расклинивающего давления β -пленок воды на поверхности стекла, кварца и слюды [8].

ходить в свободную воду, что приводит к изменению общих эффективных напряжений в глинах. Для изучения причин и закономерностей влияния температуры на прочность глинистых грунтов необходимо экспериментально определить зависимость величины расклинивающего давления гидратных пленок в глинистых грунтах от температуры.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения расклинивающего давления гидратных пленок глинистых грунтов авторами разработана, обоснована и применена специальная методика исследований. Эта методика описана ранее [10], ее сущность заключается в определении давления набухания грунта и последующего расчета величины расклинивающего давления. Такая методика в общем случае позволяет успешно исследовать давление гидратных пленок, однако ее применение в изменяющихся температурных условиях осложняется, а при испытаниях в условиях отрицательных температур невозможно из-за того, что свободная вода в грунтах при этом находится в мерзлом фазовом состоянии.

В связи с этим, для исследования давления гидратных пленок глин авторами применялась методика определения общих и реальных эффективных напряжений, разработанная и успешно опробованная при выполнении предыдущих работ. Эта методика и результаты определения на ее основе общих и реальных эффективных напряжений для разновидностей глинистых грунтов описана авторами в [11, 12]. Сущность ее заключается в том, что испытания грунтов проводятся в условиях, при которых воздействие внешних нагрузок производится только на сами контакты, при этом энергия на изменение объема испытываемого грунта, его уплотнение, разрушение, разрыв сплошности и т.п. не расходуется, а все нагрузки,

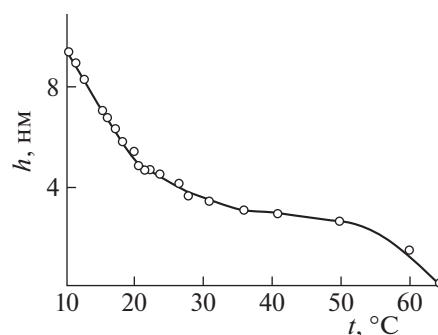


Рис. 6. Температурная зависимость толщины α -пленки воды на кварце [9, 15].

возникающие в грунте при испытании, равномерно распределяются во всей зоне их действия.

Таким условиям наилучшим образом соответствуют условия испытаний по методу чистого сдвига (скашивания). 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 (σ_w), а также реальное эффективное напряжение σ'' , как разницу общего напряжения σ' и расклинивающего давления гидратных пленок $P(h)$. Как уже было сказано выше, величина σ'' зависит от типа контакта и минералогического состава частиц и постоянна для каждого грунта. Величина $P(h)$ может изменяться в зависимости от температурных условий. Соответственно, испытания методом скашивания, проведенные при различных температурных условиях, позволяют установить закономерности изменения величины $P(h)$.

Для проведения испытаний образцы грунтов естественного сложения или модельных грунтов помещаются в прибор скашивания, размещенный в термокамере, после чего проводятся испытания при заданной температуре в диапазоне от -5°C до $+65^\circ\text{C}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изложенные выше научные положения о строении и свойствах глинистых грунтов и результаты проведенных ранее практических испытаний [11, 12] определили основные направления экспериментальных исследований.

Изменение толщины гидратных пленок и, соответственно, величины их давления обуславливает реакцию глинистых грунтов на температурное воздействие. Следовательно, для исследования этого фактора и возможности разработки прогноза изменения прочности глин при меняющихся температурах необходимо охарактеризо-

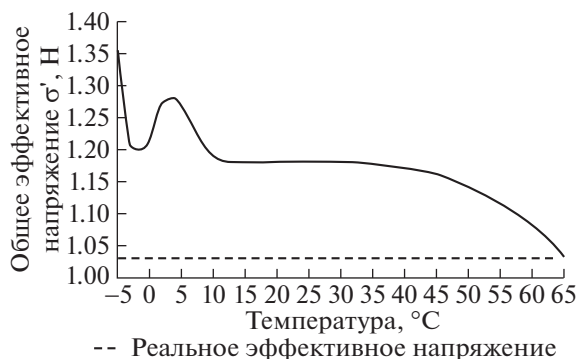
Таблица 1. Реальная эффективная прочность контактов исследованных грунтов московской морены

Реальная эффективная прочность единичного контакта преобладающего типа, Н		
переходного точечного	ближнего коагуляционного	дальнего коагуляционного
$1.4 \cdot 10^{-9}$	$3.1 \cdot 10^{-10}$	$4.3 \cdot 10^{-11}$

вать закономерности изменения величины расклинивающего давления гидратных пленок $\Pi(h)$. Исследования проводились на образцах глинистых грунтов естественного сложения и искусственно приготовленных образцах разновидностей глинистых моренных грунтов (gIIms) Московского региона различной консистенции (I_L). В их состав входят терригенная, представленная кварцем и полевыми шпатами, и глинистая, сложенная преимущественно иллитом и в меньших количествах каолинитом, составляющие. В незначительном количестве в составе глинистой фракции присутствуют смектиты. Наибольшее количество терригенной составляющей характерно для супесей, для легкой глины ее содержание минимально.

Для испытаний использовались образцы полностью водонасыщенных грунтов, чтобы исключить действие капиллярных сил в процессе испытаний. Предварительная подготовка образцов к проведению испытаний включала этап их консолидации.

Ранее авторами уже были получены характеристики реальной эффективной прочности преобладающих типов контактов в структуре описанных разновидностей глинистых грунтов. Эти данные, приведенные в табл. 1, послужили основой исследований.

**Рис. 7.** Характерный график зависимости общих эффективных напряжений σ' при разрушении контактов в единичном объеме грунта от изменения температуры (на примере тяжелых суглинков).

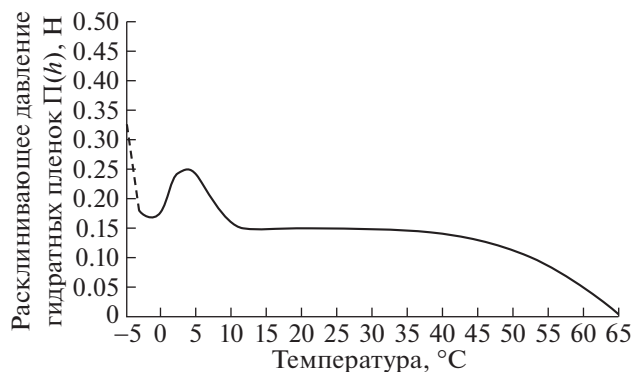
На основании этих данных и данных о количестве единичных контактов в грунтах [12] рассчитываются реальные эффективные напряжения при разрушении контактов в единичном объеме грунта σ'' для каждого преобладающего типа контакта.

По результатам испытаний методом сжатия в исследованных грунтах были определены общие эффективные напряжения σ' при разрушении контактов в единичном объеме грунта при различных температурах. Характерный график зависимости σ' от изменения температуры показан на рис. 7.

Характер изменения величины σ' от температуры аналогичен показанной выше закономерности изменения прочности глинистых грунтов (см. рис. 3 и 4), а также толщины и давления гидратных пленок от температуры (см. рис. 5 и 6). Это подтверждает высказанное выше положение, что изменение прочности связных дисперсных грунтов при воздействии температуры обусловлено изменением строения и величины расклинивающего давления гидратных пленок в этих условиях.

Разница между значениями σ'' и σ' в каждом экспериментальном испытании составляет величину расклинивающего давления гидратных пленок $\Pi(h)$ в единичном объеме грунта при температуре его проведения. Результаты расчетов для преобладающего типа контакта в структуре грунта представлены в табл. 2. Характерный график зависимости величины расклинивающего давления гидратных пленок от изменения температуры показан на рис. 8.

Наиболее активно влияние температуры проявляется для грунтов в твердом физико-химическом состоянии, в строении которых преобладают переходные точечные контакты [11]. Для таких грунтов характерно наиболее высокое расклинивающее давление гидратных пленок [10]. Для грунтов в пластичном физико-химическом состоянии, строение которых определяется преоб-

**Рис. 8.** Характерный график зависимости величины расклинивающего давления гидратных пленок $\Pi(h)$ от изменения температуры.

ладающими ближними коагуляционными контактами, изменения величины давления пленок воды проявляются значительно менее активно, а для текучих грунтов с преобладающими дальними коагуляционными контактами, расклинивающее давление гидратных пленок которых минимально, его изменение при температурном воздействии практически не проявляется.

Результаты проведенных исследований характеризуют реакцию гидратных пленок частиц в глинах на изменение температурных условий в области как положительных, так и отрицательных значений температур. При положительных температурах наибольшее давление гидратных пленок возникает в интервале от 0°C до +4°C. Очевидно, это связано с особыми свойствами, присущими воде в таких условиях (повышенная плотность и вязкость).

При повышении температуры до значений +10°C...+15°C давление пленок воды постепенно снижается и остается практически постоянным до температур +40°C...+45°C. В этих условиях гидратные пленки частиц, адсорбционный и диффузный слои находятся в стабильном состоянии, их толщина и, соответственно, давление, имеют неизменные значения, характерные для каждого грунта и типа контактов, преобладающих в его микроструктурном строении.

При дальнейшем повышении температуры происходит разрушение гидратных пленок, в первую очередь β -пленок, а впоследствии и α -пленок, что приводит к снижению величины их расклинивающего давления. Снижение продолжается до достижения температуры +65°C, при которой практически полностью разрушаются α -пленки (см. рис. 6), и общее эффективное напряжение в грунте практически сравнивается с реальным эффективным напряжением. Разрушение пленок заключается в постепенной, начиная с внешних слоев, потери связи молекул воды с минеральными частицами и переходе связной воды в свободную, что подтверждается изменением величины порового давления, показанного на рис. 9, резко возрастающего в этих условиях.

При отрицательных температурах изменение давления гидратных пленок носит иной характер. В интервале температур от 0°C до -4°C расклинивающее давление остается постоянным, и его величина соответствует аналогичным значениям в диапазоне от +10°C до +40°C. Это показывает, что в этом диапазоне отрицательных температур до -4°C гидратные пленки также находятся в стабильном состоянии, их строение и свойства не изменяются. При снижении температуры ниже -5°C происходит замерзание воды гидратных пленок, что приводит к резкому увеличению величины общего эффективного напряжения при разрушении грунта.

Таблица 2. Величина расклинивающего давления гидратных пленок в грунтах московской морены с различным преобладающим типом контактов

Температура, °C	Величина расклинивающего давления гидратных пленок в единичном объеме грунтов с преобладающим типом контактов $P(h)$, Н		
	переходный точечный	ближний коагуляционный	дальний коагуляционный
-5	2.21	0.70	0.498
-3	1.21	0.28	0.047
-2	1.20	0.28	0.046
-1	1.20	0.28	0.046
0	1.21	0.28	0.046
+1	1.24	0.29	0.046
+2	1.27	0.30	0.048
+4	1.28	0.32	0.048
+5	1.27	0.27	0.048
+10	1.19	0.27	0.046
+15	1.18	0.27	0.046
+20	1.18	0.27	0.046
+30	1.18	0.27	0.046
+40	1.17	0.27	0.045
+45	1.16	0.27	0.044
+50	1.14	0.26	0.043
+55	1.12	0.26	0.042
+60	1.08	0.25	0.041
+65	1.03	0.24	0.040

Такие изменения свойств гидратных пленок может быть связано с изменением строения их диффузных слоев. В рассмотренном диапазоне отрицательных температур, характерном для многолетнемерзлых пород в естественном залега-

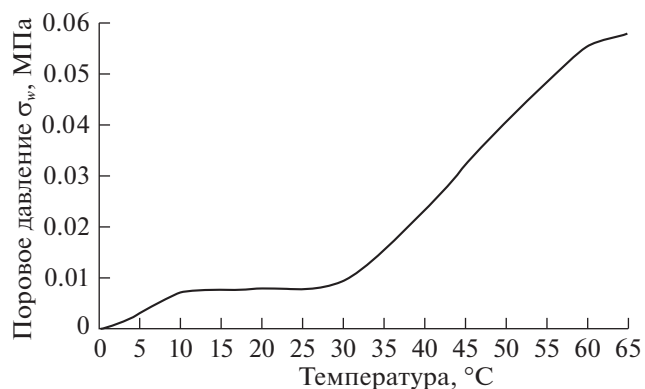


Рис. 9. Характерный график зависимости величины порового давления σ_w от изменения температуры.

нии, адсорбционные слои не меняют своего строения, так как вода в них не замерзает даже при температурах ниже -10°C [1]. Согласно полученным данным, при температурах от -5°C до 0°C вода β -пленок также находится в жидком фазовом состоянии, и величина их расклинивающего давления сопоставима со значениями в области положительных температур $+10^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$. В таких условиях, при повышении температуры выше -5°C , в мерзлых грунтах может происходить выделение газов, содержащихся в диффузных слоях гидратных пленок частиц, приводящее к снижению их прочности [16], при том, что свободная вода в этих условиях остается замерзшей.

С позиций оценки структурных преобразований в грунтах при флуктуациях температур можно отметить следующее.

В условиях действия высоких положительных температур, при которых в глинах происходит практически полное разрушение гидратных пленок, появляются предпосылки изменений их структуры, характерные для их постседиментационных преобразований на стадии среднего и позднего катагенеза. На этой стадии литогенеза происходят формирование устойчивых необратимых фазовых контактов между частицами и преобразование дисперсных глин в скальные грунты — аргиллиты. Это положение было изучено на примере глин сочинской свиты $P_3\text{сщ}$. Такие глины, в силу историко-геологических особенностей их формирования, обладают специфическими свойствами, в первую очередь, способностью к активной гидратации при контакте с водой [18, 19]. За счет особенностей минерального состава сносимого материала, седиментогенеза и катагенеза под воздействием высокого геостатического давления при температурах, не превышавших 60°C в условиях опресненного водоема, в них образовывались не цементационные фазовые контакты, характерные для аргиллитов, а переходные контакты ионно-электростатического типа [14, 18], что определило специфические свойства данных грунтов. Глины сочинской свиты отличаются высокой гидрофильностью, при контакте с водой они активно набухают (по результатам экспериментальных исследований величина давления набухания достигает 0.17 МПа), что приводит к существенному снижению их прочности и, в следствие этого, к многочисленным авариям при строительном освоении.

Грунты испытывались действием различных нагрузок при разных температурах, после чего исследовалось изменение их свойств. Было определено, что после длительного воздействия нагрузки в 1.1 МПа при температуре $+65^{\circ}\text{C}$ грунты теряли способность к гидратации и становились практически ненабухаемыми. Это может быть объяснено тем, что в таких условиях происходит разрушение диффузных и адсорбционных слоев

гидратных пленок частиц, под действием внешних нагрузок минеральные частицы сближаются, и в этих условиях между ними начинают формироваться новые необратимые фазовые контакты.

ВЫВОДЫ

Результаты выполненных исследований показывают, что температурные условия являются важным фактором, влияющим на прочность глинистых грунтов. Изучение этого вопроса возможно с позиций физико-химической теории прочности грунтов, рассматривающей их внутреннее строение и взаимодействие между компонентами дисперсной фазы и дисперсионной среды. Изменение прочности глин при действии температурного фактора обусловлено свойствами гидратных пленок минеральных частиц. При вариациях температуры меняется строение, толщина и свойства гидратных пленок, баланс сил взаимодействия между частицами, что приводит к изменению свойств грунтов в целом, в том числе прочностных свойств.

Гидратные пленки минеральных частиц в глинистых грунтах в естественных условиях состоят из двух слоев — адсорбционного (α -пленки) и диффузного (β -пленки). При температурах выше $+40^{\circ}\text{C}$ начинается постепенное разрушение гидратных пленок, в первую очередь β -пленок, а впоследствии и α -пленок, вода из которых переходит в свободную воду. Разрушение гидратных пленок продолжается до достижения температуры $+65^{\circ}\text{C}$. В таких условиях возникают предпосылки для катагенетических изменений строения глин, которые могут происходить при одновременном действии внешних нагрузок, что приводит к преобразованию дисперсных глин в скальные грунты — аргиллиты.

Воздействие отрицательных температур также оказывает влияние на строение и свойства гидратных пленок. Наиболее сильно оно проявляется в условиях повышенных отрицательных температур, характерных для многолетнемерзлых грунтов в современных климатических условиях. При температуре выше -5°C вода β -пленок находится в жидком фазовом состоянии, а их строение и свойства аналогичны тем, которыми они обладают при положительных температурах. Это может вызывать изменения строения и свойств мерзлых грунтов при повышении температуры в указанном диапазоне при сохранении общего мерзлого фазового состояния свободной воды и грунтов в целом.

Наибольшее влияние изменение температуры оказывает на строение и свойства гидратных пленок в твердых грунтах, для пластичных грунтов оно сказывается существенно меньшим и практически не проявляется в текучих грунтах, что связано с типом контактов минеральных частиц,

преобладающих в грунтах в каждом физико-химическом состоянии.

Затронутые вопросы требуют особого внимания и дальнейшего изучения для разработки объективного и достоверного прогноза изменения свойств связных дисперсных грунтов в различных температурных условиях.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № г.р. АААА-А19-119021190077-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананян А.А. Оценка средней толщины пленок воды в талых и мерзлых тонкодисперсных горных породах // Связанная вода в дисперсных системах. Вып. 2. М.: Изд-во МГУ, 1972. С. 106–113.
2. Дерягин Б.В., Обухов Е.В. Аномальные свойства тонких слоев жидкости // Коллоидный журнал. 1935. Т. 1. Вып. 5. С. 385–398.
3. Дерягин Б.В., Кусаков М.М. Экспериментальное исследование сольватации поверхностей // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1937. № 5. С. 1119–1152.
4. Дерягин Б.В. Теория гетерокоагуляции, взаимодействия и слипания разнородных частиц в растворах электролитов // Коллоидный журнал. 1954. Т. 16. № 6. С. 425–438.
5. Дерягин Б.В., Нерпин С.В. Равновесие, устойчивость и кинетика свободных пленок жидкости // Докл. АН СССР. 1954. Т. 99. № 6. С. 1029–1032.
6. Дерягин Б.В. Устойчивость коллоидных систем // Успехи химии. 1979. Т. 48. № 4. С. 675–721.
7. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Смачивающие пленки. М.: Наука, 1984. 137 с.
8. Дерягин Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. М.: Наука, 1986. 205 с.
9. Ершова Г.Ф., Зорин З.М., Чураев Н.В. Температурная зависимость толщины полимолекулярных адсорбционных слоев воды на поверхности кварца // Коллоидный журн. 1975. Т. 37. № 1. С. 208–210.
10. 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.
11. Карпенко Ф.С. Физико-химическая природа пределов пластичности глинистых грунтов // Геоэкология. 2018. № 5. С. 66–72.
12. Карпенко Ф.С. Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // Геоэкология. 2019. № 5. С. 48–60.
13. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИГЭ РАН, 2012. 74 с.
14. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
15. Перевертаев В.Д., Мецик М.С. Исследование адсорбции паров воды на поверхности кристаллов слюды // Коллоидный журн. 1966. Т. 28. № 2. С. 254–259.
16. Собин Р.Г., Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н. Влияние газовой компоненты на свойства мерзлых грунтов и динамика ее выделения при изменении температуры // Сергеевские чтения. Геоэкологические аспекты реализации национального проекта “Экология”. Диалог поколений. Матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: РУДН, 2020. С. 204–210.
17. Хименков А.Н., Кошурников А.В., Карпенко Ф.С. и др. О фильтрации газов в многолетнемерзлых породах в свете проблемы дегазации литосферы Земли и формирования естественных взрывных процессов в криолитозоне // Арктика и Антарктика. 2019. № 3. С. 16–38.
18. Хмелевцов А.А. Инженерно-геологические свойства аргиллитоподобных глин сочинской свиты и их влияние на условия строительства в городе Сочи: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Ростов-на-Дону, 2014. 33 с.
19. Хмелевцов А.А., Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Кальбергенов Р.Г. Особенности строения и физико-химических свойств аргиллитоподобных глин сочинской свиты в связи с условиями их образования // Сергеевские чтения. Развитие научных идей академика Е.М. Сергеева на современном этапе. Вып. 16. М.: РУДН, 2014. С. 145–149.
20. Чувиллин Е.М., Перлова Е.В. Формы нахождения и условия формирования газовой компоненты мерзлых пород // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 1999. № 5. С. 55–57.

THE INFLUENCE OF VARIATIONS IN HYDRATE FILM PROPERTIES ON THE STRENGTH OF CLAY SOILS UPON THERMAL IMPACTS

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

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

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

Changes in soil strength under the influence of temperature affect soil stability and safety of construction and operation of engineering structures. The need to adapt to such changes and reduce their adverse impact requires the development of a method for reliable and objective prediction of changes in the strength properties of soils at different temperatures. The problem of changing the strength properties of clay soils under temperature influence are considered from the viewpoint of physical and chemical mechanics. It is shown that the reaction of coherent dispersed soils to temperature influence is determined by the properties of hydrate films of soil-composing mineral particles. During temperature fluctuations, water of hydrate films may lose its

connection with particles and pass to free water. Changing thickness of hydrate films changes their splitting pressure, disturbing the balance of particle interaction forces, which affects the soil strength as a whole.

Keywords: *clay soils, structural contacts, α - and β -films, disjoining pressure of hydrate films, general effective stresses, actual effective stresses*

REFERENCES

1. Ananyan, A.A. *Otsenka srednei tolshchiny plenok vody v talykh i merzlykh tonkodispersnykh gornykh porodakh* [Estimation of average thickness of water films in thawed and frozen fine-dispersed soils]. *Svyazannaya voda v dispersnykh sistemakh*. Moscow, MGU Publ., 1972, vol. 2, pp. 106–113. (in Russian)
2. Deryagin, B.V., Obukhov, E.V. *Anomal'nye svoystva tonkikh sloev zhidkosti* [Anomaly properties of thin liquid layers]. *Kolloidnyi zhurnal*, 1935, vol. 1, is. 5, pp. 385–398. (in Russian)
3. Deryagin, B.V., Kusakov, M.M. *Eksperimental'noe issledovanie sol'vatatsii poverkhnostei* [Experimental investigation of surface solvation] *Izv. AN SSSR, Ser. Khim.*, 1937, no. 5, pp. 1119–1152. (in Russian)
4. Deryagin, B.V. *Teoriya geterokoagulyatsii, vzaimodeistviya i slipaniya raznorodnykh chastits v rastvorakh elektrolitov* [Theory of heterocoagulation, interaction and adhesion of dissimilar particles in electrolyte solutions]. *Kolloidnyi zhurnal*, 1954, vol. 16, no. 6, pp. 425–438. (in Russian)
5. Deryagin, B.V., Nerpin, S.V. *Ravnovesie, ustoychivost' i kinetika svobodnykh plenok zhidkosti* [Equilibrium, stability and kinetics of free liquid films]. *Dokl. AN SSSR*, 1954, vol. 99, no. 6, pp. 1029–1032. (in Russian)
6. Deryagin, B.V. *Ustoychivost' kolloidnykh sistem* [Stability of colloidal systems]. *Uspekhi khimii*, 1979, vol. 48, no. 4, pp. 675–721. (in Russian)
7. Deryagin, B.V., Churaev, N.V. *Smachivayushchie plenki* [Wetting films]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 137 p. (in Russian)
8. Deryagin, B.V. *Teoriya ustoychivosti kolloidov i tonkikh plenok* [Theory of stability of colloids and thin films]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 205 p. (in Russian)
9. Ershova, G.F., Zorin, Z.M., Churaev, N.V. *Temperaturnaya zavisimost' tolshchiny polimolekulyarnykh adsorbtionnykh sloev vody na poverkhnosti kvartsa* [Temperature dependence of the thickness of polymolecular adsorption water layers on the quartz surface]. *Kolloidnyi zhurnal*, 1975, vol. 37, no. 1, pp. 208–210. (in Russian)
10. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G. *Vliyaniye rasklinivayushchego deystviya 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)
11. 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)
12. Karpenko, F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda prochnosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil strength]. *Geoekologiya*, 2019, no. 5, pp. 48–60. (in Russian)
13. Osipov, V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh* [Physicochemical theory of effective stresses in soils]. Moscow, IGE RAN. 2012, 74 p. (in Russian)
14. Osipov, V.I., Sokolov, V.N. *Gliny i ikh svoystva. Sostav, stroenie i formirovaniye svoystv* [Clays and their properties. Composition, structure and formation of properties]. Moscow, GEOS Publ. 2013. 576 p. (in Russian)
15. Perevertaev, V.D., Metsik, M.S. *Issledovanie adsorbtsii parov vody na poverkhnosti kristallov slyudy* [Investigation of water vapor adsorption on the surface of mica crystals]. *Kolloidnyi zhurnal*, 1966, vol. 28, no. 2, pp. 254–259. (in Russian)
16. Sobin, R.V., Karpenko, F.S., Kutergin, V.N. Influence of the gas component on the properties of frozen soils and dynamics of its release when temperature changes. *Sergeevskie chteniya. Geoekologicheskiye aspekty realizatsii natsional'nogo proyekta Ekologiya. Dialog pokolenii*. [Proc. of the 22nd scientific conference in commemoration of academician E.M. Sergeev on the topic "Geoecological aspects of the implementation of the national project Ecology. Dialogue of Generations". Vol. 22, Moscow, 2020, pp. 204–210. (in Russian)
17. Khimenkov, A.N., Koshurnikov, A.V., Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Gagarin, V.E., Sobolev, P.A. *O fil'tratsii gazov v mnogoletnemerzlykh porodakh v svete problemy degazatsii litosfery Zemli i formirovaniya estestvennykh vzryvnykh protsessov v kriolitozone* [On gas filtration in permafrost rocks in the context of the Earth's lithosphere degassing and the formation of natural explosive processes in the permafrost zone]. *Arktika i Antarktika*, 2019, no. 3, pp. 16–38. (in Russian)
18. Khmelevtsov, A.A. *Inzhenerno-geologicheskie svoystva argillitopodobnykh glin sochinskoi svity i ikh vliyaniye na usloviya stroitel'stva v gorode Sochi* [Engineering and geological properties of mud-like clays of the Sochi formation and their influence on construction conditions in Sochi]. Extended Abstract of Cand. (Geol.-Min.) Dissertation, Rostov-on-Don. 2014. 33 p. (in Russian)
19. Khmelevtsov, A.A., Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G. Features of the structure and physical and chemical properties of mud-like clays of the Sochi formation in connection with the conditions of their formation. *Sergeevskie chteniya. Razvitiye nauchnykh idei akademika E.M. Sergeeva na sovremennom etape*. [Proc. of the 16th scientific conference in commemoration of academician E.M. Sergeev on the topic "Development of scientific ideas of academician Sergeyev at the present stage"]. Vol. 16. Moscow, 2014, pp. 145–149. (in Russian)
20. Chuvilin, E.M., Perlova, E.V. *Formy nakhozhdeniya i usloviya formirovaniya gazovoi komponenty merzlykh porod* [Forms of occurrence and formation conditions of the gas component in frozen rocks]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geolog.*, 1999, no. 5, pp. 55–57. (in Russian)