

ТОНКИЕ ПЛЁНКИ АДсорБИРОВАННОЙ ВОДЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

© 2023 г. В. И. Осипов^{а,*}

^аИнститут геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия

*E-mail: osipov@geoenv.ru

Поступила в редакцию 30.05.2023 г.

После доработки 26.09.2023 г.

Принята к публикации 06.10.2023 г.

В статье рассматривается несоответствие между расчётом прочности тонкодисперсных грунтов на основе теории Кулона—Мора и фактическими данными. Основная причина этого — оценка эффективного напряжения грунтов по формуле К. Терцаги, которая не учитывает внутренние напряжения, возникающие на контактах частиц минералов с поверхностными плёнками адсорбированной воды. Автор предлагает модифицировать теорию Терцаги и перейти к использованию в формуле показателей общих (внешних и внутренних) напряжений.

Ключевые слова: эффективные напряжения, адсорбированная вода, тонкие плёнки адсорбированной воды, расклинивающее действие тонких плёнок, внутренние и внешние напряжения.

DOI: 10.31857/S0869587323110075, EDN: CNMTKP

В России изучение физико-химических процессов, происходящих в твёрдых пористых телах с участием воды, получило развитие благодаря академикам П.А. Ребиндеру и Б.В. Дерягину, а также их многочисленным ученикам, создавшим новое междисциплинарное научное направление — *физико-химическую механику пористых тел*. Она объединила современные достижения в области молекулярной физики, коллоидной химии и классической механики. При этом большое значение приобрела проблема тонких гидратных плёнок.

В 1980 г. по инициативе академика Е.М. Сергеева в Московском университете была создана межфакультетская программа по изучению роли тонких гидратных плёнок в геологических, био-

логических и почвенных объектах. В работе принимали участие физики, химики, биологи, математики, геологи, механики, почвоведы. Профессора Е.Д. Шукин, Н.В. Перцев, Р.И. Нигматуллин, С.С. Григорян и В.И. Осипов были приглашены в качестве научных руководителей разделов программы “Физико-химическая механика деформаций, разрушения и диспергирования дисперсных систем под действием жидких фаз”. По результатам междисциплинарных исследований коллектива учёных в 1985 г. в издательстве Московского университета вышла уникальная монография “Физико-химическая механика природных дисперсных систем” [1]. Настоящая статья является, по сути, продолжением этих работ и основана на применении достижений физико-химической механики для оценки и анализа природных глинистых систем. Так выявилась необходимость модификации широко распространённой теории эффективных напряжений К. Терцаги.



ОСИПОВ Виктор Иванович — академик РАН, научный руководитель ИГЭ РАН.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ (ТЕОРИЯ ТЕРЦАГИ)

Согласно теории Кулона—Мора, прочность на сдвиг (τ) дисперсных пористых систем основывается на сохранении величины угла внутреннего трения и сцепления грунта с ростом внешнего на-

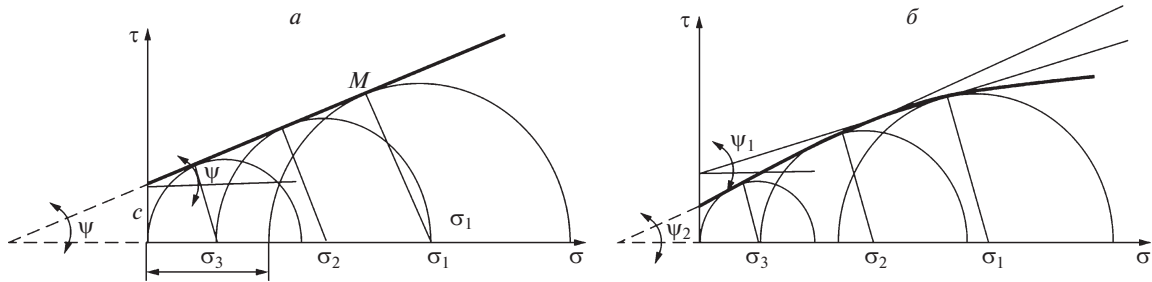


Рис. 1. Диаграмма сдвига, построенная в соответствии с теорией Кулона–Мора (а) и полученная по экспериментальным данным (б)

пряжения, то есть их *неизменности во всём диапазоне нормальных напряжений σ при сдвиге* (рис. 1, а):

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \phi + c, \quad (1)$$

где: c — отрезок, отсекаемый кривой сдвига на оси прочности; ϕ — угол наклона кривой напряжения сдвига к оси внешних напряжений (угол внутреннего трения).

Многочисленные экспериментальные данные показывают, что эти требования выполняются только для крупнообломочных дисперсных грунтов и песков. В то же время при работе со связными глинистыми грунтами огибающая круги напряжений (круги Мора) криволинейна, и лишь отдельные её отрезки могут быть аппроксимированы линейным уравнением Мора–Кулона (рис. 1, б). Особенно заметные отклонения наблюдаются при сдвиге слаболитифицированных грунтов в интервале нормальных нагрузок до 300 кПа. При более высоких напряжениях нелинейность графиков сдвига сглаживается.

Криволинейность огибающей кривой указывает на изменчивость угла внутреннего трения и сцепления в зависимости от напряжённого состояния. Это свидетельствует о несоответствии экспериментальных данных теоретическим, так как теория не отражает в полной мере свойства дисперсных систем и природу деформационных процессов, происходящих при сдвиге. Прежде всего это касается распределения напряжения при сдвиге во влажных телах, к которым относятся глинистые грунты.

Теория Кулона–Мора предусматривает равномерное распределение напряжения по всему объёму грунта с образованием общего напряжения $\sigma = p/s$ кПа. В действительности, согласно исследованиям К. Терцаги, только часть напряжения σ (получившая название *эффективное напряжение*) передаётся на скелет породы, а другая часть расходуется на формирование гидродинамического давления в поровой воде и не оказывает влияния на напряжённое состояние. Поэтому эффективное напряжение находится из выражения:

$$\sigma' = \sigma - u,$$

где: σ — общее внешнее напряжение; u — поровое давление. С учётом этого прочность на сдвиг получается из:

$$\tau = \operatorname{tg} \phi (\sigma - u) + c, \quad (2)$$

где: ϕ — угол внутреннего трения; c — структурное сцепление.

Теория эффективных напряжений, разработанная Терцаги, — одна из фундаментальных основ современной механики грунтов. Она широко используется при решении задач консолидации пористых проницаемых грунтов, объяснения причин разжижения песчаных пород при землетрясениях и иных вопросов. Кроме того, в производственной практике накоплен большой экспериментальный материал, свидетельствующий о том, что при применении теории Терцаги к тонкодисперсным (глинистым) грунтам с низкой проницаемостью сохраняется расхождение расчётных и экспериментальных данных. Неоднократно предпринимались попытки усовершенствовать уравнения. Несмотря на активные исследования в этом направлении, оставались нерешёнными вопросы перехода от напряжённого состояния твёрдого пористого тела к напряжённому состоянию влажных тонкодисперсных тел.

Главная неопределённость теории эффективных напряжений К. Терцаги заключается в том, что в ней не рассматриваются физико-химические процессы на границе минерал–вода, приводящие к образованию на поверхности частиц тонкой плёнки адсорбированной воды и появлению на контактах расклинивающего давления. Это давление, в свою очередь, создаёт внутреннее напряжение, которое, как и внешнее, передаётся на скелет грунта и влияет на его прочность.

ПЛЁНКИ АДсорБИРОВАННОЙ ВОДЫ

Механизм формирования. Адсорбированной считается тонкая плёнка воды, образующаяся под воздействием поверхностных сил минерала или других твёрдых тел и обладающая специфическими свойствами и структурой. Глинистые минералы активно участвуют в образовании двух её ви-

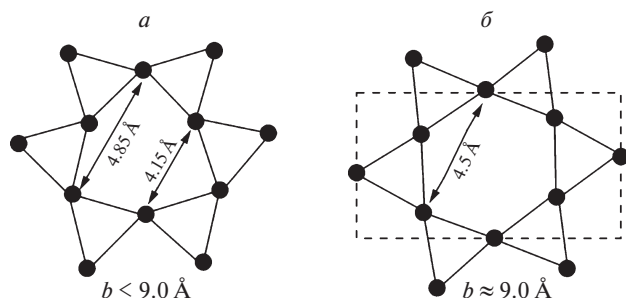


Рис. 2. Структурный мотив ячейки кислородной поверхности глинистого минерала (а) и ячейки свободной воды (б) [2]

дов. Первый — вода, скапливающаяся непосредственно на поверхности за счёт адсорбции её молекул из воздуха и удержании их в физически связанном состоянии. Адсорбция приводит к возникновению полимолекулярной *структурированной гидратной плёнки*. В основе этого механизма лежит реакция между молекулами воды и силикатной поверхностью минералов: образуются водородные связи, которые служат своеобразным мостиком между ними.

В формировании структурного слоя большую роль играет строение поверхности. Адсорбция молекул воды предусматривает наложение её слоёв на структурную сетку минерала (рис. 2). Несовместимость структуры воды и поверхности обуславливает эпитаксиальный механизм их взаимодействия, с постепенным приспособлением обеих структур друг к другу путём последовательных трансформаций водородных связей. Возникающие на границе минерал—вода напряжения распространяются внутрь слоя адсорбированной

воды и кристалла, вызывая изменение структуры воды и, соответственно, её свойств.

При повышении максимальной гигроскопической влажности в грунтах происходит образование второго вида адсорбированной воды — *воды диффузных гидратных оболочек* (рис. 3). Такая вода не имеет какой-либо упорядоченной структуры, тем не менее, как и вода структурно-ориентированной плёнки, находится под влиянием электрического поля частиц и обладает специфическими свойствами.

Толщина плёнок. Определение толщины плёнок адсорбированной воды проводилось [3–5] путём изучения адсорбции водяного пара на плоскостях стекла, кварца и слюды с одновременным эллипсометрическим измерением толщины полимолекулярной плёнки. Толщина плёнок первого типа (структурированного слоя) для глинистых минералов изменяется от 0.3 до 7.2 нм. При этом у кристаллов каолинита плёнка существенно толще (3.4–3.7 нм), чем у монтмориллонита (0.3–0.5 нм). Несмотря на это, монтмориллонит адсорбирует больше общего объёма воды, чем каолинит, за счёт подвижности структуры и значительной площади адсорбируемых поверхностей. Толщина же плёнки воды диффузных оболочек обменных катионов составляет от 50 до нескольких сотен нм и зависит от валентности катионов и их концентрации.

Свойства плёнок. Внимание на специфические свойства плёнок адсорбированной воды впервые обратил Б.В. Дерягин со своими учениками [3, 6]. Позднее изучение наноплёнок стало предметом многочисленных исследований отечественных и зарубежных учёных [2, 4, 7–12]. Наличие в них анизотропного напряжения, обусловленного де-

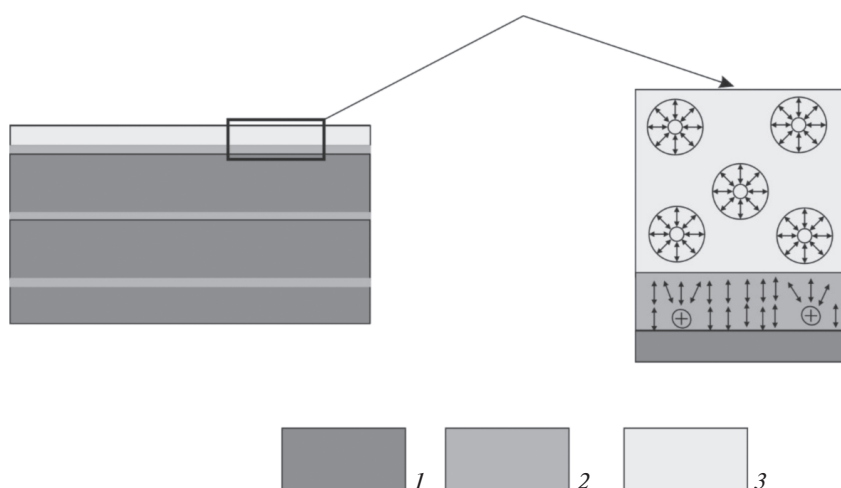


Рис. 3. Схема структуры плёнки адсорбированной воды на поверхности глинистого минерала
1 — поверхность минерала; 2 — структурно ориентированная адсорбированная вода; 3 — диффузная адсорбированная вода ионных атмосфер

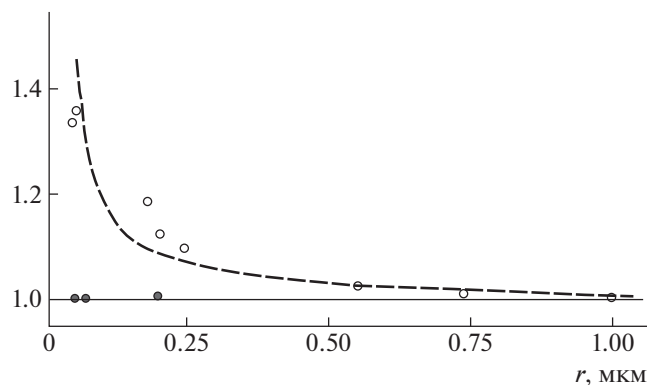


Рис. 4. Зависимость относительной вязкости воды (пунктир) и неполярной жидкости CCl_4 (сплошная линия) от радиуса кварцевых капилляров [14]

формацией водородных связей и образованием диффузных гидратных оболочек катионов, определяет их специфические гидродинамические характеристики, заключающиеся в том, что они не передают порового давления и не обладают взвешивающим эффектом. Кроме того, от свободной воды плёнки отличаются растворяющей способностью, теплофизическими, диэлектрическими и другими свойствами. Например, растворяющая способность воды в наноплёнках более чем в 10 раз ниже, чем у свободной воды [13].

Интерес представляют структурно-механические свойства наноплёнок, прежде всего их вязкость. Установлено, что вода в тонких плёнках обладает повышенной вязкостью по сравнению с обычной [11]. Это подтверждается её поведением в тонких капиллярах, сечение которых перекрывается адсорбированной водой. Вязкость начинает повышаться в капиллярах радиусом < 100 нм,

а в капиллярах радиусом ≈ 30 нм оказывается в 1.5 раза выше вязкости свободной воды (рис. 4). С повышенной вязкостью наноплёнок связано наличие в тонкодисперсных глинах начального градиента фильтрации. Следует отметить, что изменения структуры и свойств тонких плёнок характерны только для полярных жидкостей, подобных воде, в то время как в неполярных (в частности, в четырёххлористом углероде) такие изменения не происходят.

Подтверждением повышенной вязкости тонких плёнок воды служит скорость её испарения из капилляров. Эксперименты доказали, что вязкость воды в плёнке толщиной 3–4 нм составляет 0.03–0.05 пз (при 23–30°C), то есть в 3–5 раз превышает показатель свободной воды [11].

Плёнка проявляет сильную температурную зависимость. При повышении температуры она уменьшается, а при достижении 65°C полностью исчезает, что объясняется разрушением её структуры под влиянием теплового движения молекул (рис. 5, а). Фазовый переход адсорбированной воды в лёд происходит при более низких (отрицательных) температурах по сравнению со свободной: с уменьшением толщины плёнки снижается температура её замерзания (рис. 5, б).

Поровое пространство, занятое плёнками адсорбированной воды, обычно относится к общей пористости грунта. В то же время плёнки, обладающие специфическими гидродинамическими свойствами, не реагируют на сжимающее напряжение. Поэтому сжимаемость грунтов следует определять с учётом не общей, а активной пористости, что может привести к изменению коэффициента сжимаемости у лёгких суглинков до 2%, а у тяжёлых глин – до 8% [16].

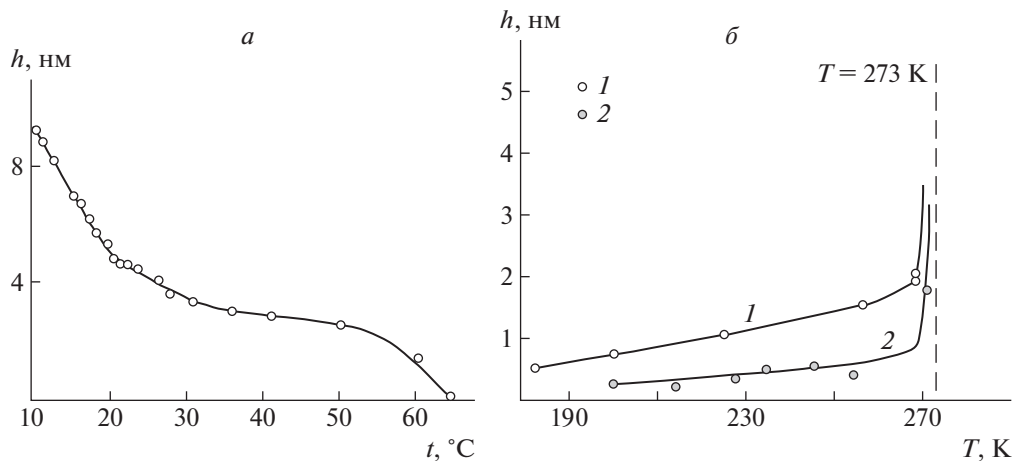


Рис. 5. Зависимость толщины плёнки адсорбированной воды а – на кварце от температуры [7]; б – незамёрзшей воды (h) от температуры на поверхности Са-каолинита (1) и На-монтмориллонита (2) [15]

РАСКЛИНИВАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ПЛЁНОК

Природа расклинивающего действия. При сближении частиц происходит перекрытие плёнок адсорбированной воды, сопровождающееся изменением свободной энергии Гиббса, что приводит к появлению сил отталкивания между частицами (рис. 6). Избыточное давление, которое проявляют плёнки при их перекрытии на контактах частиц, названо *расклинивающим давлением*. Благодаря наличию таких сил объясняются существование дисперсных систем в природе и предотвращение их коагуляции и укрупнения, а также появление давления в глинах при отсутствии возможности изменения их объёма (*давление набухания*).

Величина расклинивающего давления граничных плёнок $\Pi(h)$ определяется вкладом поверхностных сил притяжения и отталкивания различной природы между плоскостью минералов и адсорбированной водой [2–7, 11, 17, 18]. В первом приближении этот вклад можно считать аддитивным, состоящим из следующих компонентов:

$$\Pi(h) = \Pi_e(h) + \Pi_m(h) + \Pi_s(h),$$

где: Π_e – электростатическая составляющая, обусловленная перекрытием диффузных ионных слоёв заряженных поверхностей частиц и их отталкиванием; Π_m – молекулярная составляющая, сформированная в результате дисперсионного взаимодействия твёрдой подложки через тонкую плёнку жидкости и притягиванием частиц; Π_s – структурная составляющая, объясняемая перекрытием слоёв адсорбированной воды с изменённой структурой, взаимодействующих непосредственно с поверхностью минерала.

Входящие в выражение молекулярная, электростатическая и структурная компоненты расклинивающего давления действуют одновременно, но имеют различные закономерности изменений. Молекулярная составляющая – отрицательная, то есть стремится сблизить частицы и проявляется в той или иной степени при толщине граничной плёнки $\Pi_m < 50$ нм. Электростатическая и структурная компоненты – положительные и препятствуют сближению частиц. Электростатическая компонента Π_e характеризуется наибольшим дальностью действия, поэтому толстые плёнки воды на поверхностях минеральных зёрен в разбавленных электролитах устойчивы. Значение Π_e определяется величиной заряда плоскости минерала. При толщине плёнки менее 10 нм её устойчивость повышается в основном за счёт структурной компоненты расклинивающего давления Π_s .

Изотермы расклинивающего давления. Первые попытки определения расклинивающего давления были предприняты Б.В. Дерягиным и М.М. Кусаковым [3] путём измерения давления в тонкой гидратной плёнке на контакте твёрдой поверхности с пузырьком воздуха (рис. 7). В эксперименте

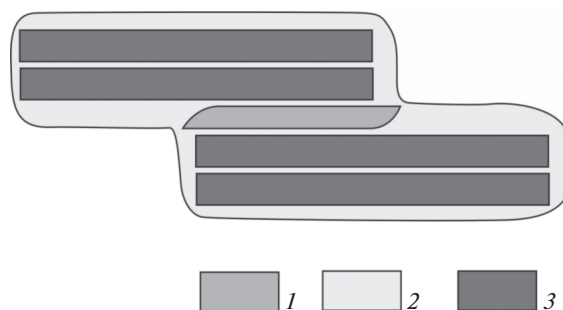


Рис. 6. Образование сил отталкивания между плоскими поверхностями при перекрытии плёнок адсорбированной воды

1 – зона перекрытия плёнок адсорбированной воды (расклинивающее давление); 2 – адсорбированная вода; 3 – частица

создавались условия, когда пузырьки воздуха различного радиуса R_0 , всплывая, приближались к твёрдой поверхности. Всплывший пузырёк образовывал с ней контактную площадку радиусом r_1 с граничной плёнкой толщиной h . Путём измерения радиуса пузырька и толщины граничной плёнки оценивалось расклинивающее давление по капиллярному давлению пузырька:

$$\Pi - 2\sigma_w/R_0 = \Delta P_k,$$

где: σ_w – поверхностное натяжение воды; ΔP_k – капиллярное давление пузырька; R_0 – радиус пузырька.

Зависимость суммарного действия сил расклинивающего давления граничной гидратной наноплёнки в зазоре между твёрдыми телами от толщины плёнки h получила название *изотерма расклинивающего давления* [5]. Качественная кар-

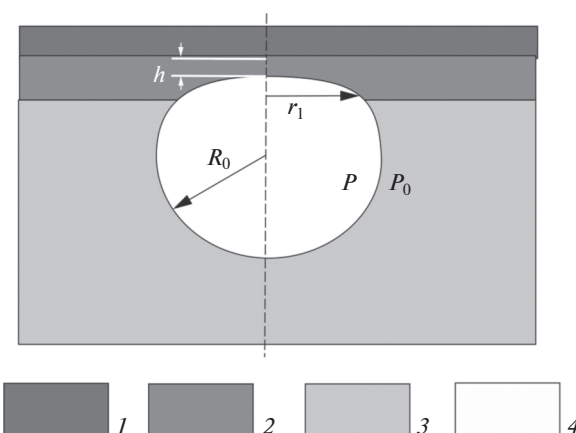


Рис. 7. Пузырьковый метод получения изотермы расклинивающего давления гидратной плёнки связанной воды

1 – твёрдое тело; 2 – адсорбированная вода; 3 – свободная вода; 4 – пузырёк воздуха

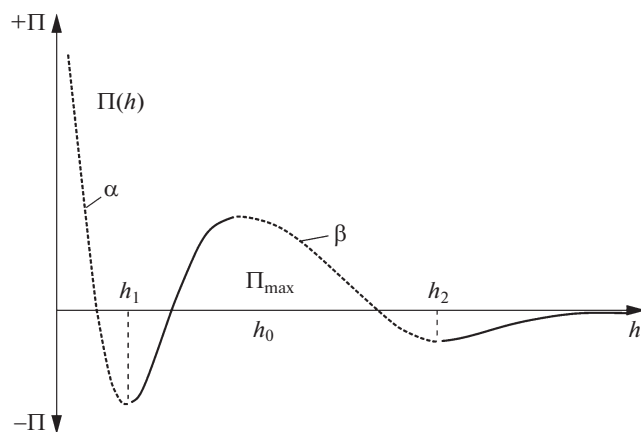


Рис. 8. Интегральная изотерма расклинивающего давления плёнки [5]

тина такой зависимости показана на рисунке 8: на диаграмме выделяются две ветви (α и β) устойчивости плёнок. Ветвь β соответствует плёнкам до нескольких сотен нанометров, она обусловлена расклинивающим действием электростатической составляющей и связана с перекрытием диффузных ионных слоёв. Ветвь α объясняется структурной составляющей расклинивающего давления тонкой поверхностной плёнки не более 10 нм. Толщина наноплёнок, отвечающая α - и β -ветвям изотерм адсорбции, характеризует термодинамически равновесные состояния, на которых могут фиксироваться взаимодействующие частицы и образовываться объёмные формации.

Обобщение экспериментальных данных по изучению расклинивающего давления β -плёнок в зависимости от их толщины дало значения от 0.1×10^4 до 1.4×10^4 дин/см². При благоприятных физико-химических условиях максимальное расклинивающее давление β -плёнки при её критической толщине достигает 3×10^6 дин/см² [5]; β -плёнка в 40–70 нм может разрушиться. Уменьшение толщины β -плёнки и её разрушение зависят от концентрации электролита в растворе и ряда других физико-химических факторов (например, понижения pH растворов до изоэлектрического состояния поверхности минерала).

КОНТАКТЫ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

Типы контактов. Передача напряжений в пористых дисперсных системах идёт не по всей межфазной поверхности грунта, а только в местах наибольшего сближения — контактах. Количество и характер индивидуальных контактов — важнейшее качество дисперсных структур, определяющее их деформационные, прочностные и иные свойства.

В зависимости от формы взаимодействующих частиц контакты могут быть нескольких геометрических типов: между сферическими частицами, между сферическими и плоскими частицами, между плоскими частицами. Последние подразделяются на контакты скол—скол, базис—скол и базис—базис [19]. Несмотря на разнообразие геометрических контактов, в энергетическом отношении их можно подразделить на три вида: коагуляционные, переходные (точечные) и фазовые [20–24]. Каждый из них характеризуется определённым механизмом образования и природой действующих в его зоне сил (рис. 9).

Коагуляционные контакты (см. рис. 9, а) формируются между действующими частицами при сохранении термодинамически устойчивой прослойки адсорбированной воды [20, 25]. В природных условиях они встречаются в таких водонасыщенных тонкодисперсных фракциях, как илы, слаболигифицированные глинистые осадки, набухающие глины пластичной или текучей консистенции и другие дисперсные системы. Важную роль в их образовании играют плёнки адсорбированной воды, противостоящие сближению частиц. Термодинамически устойчивое состояние коагуляционных контактов создаётся при определённых толщинах граничных плёнок, отвечающих α - и β -ветвям изотермы адсорбции. В соответствии с этим коагуляционные контакты принято подразделять на две разновидности: дальние, ориентировочно соответствующие толщине β -плёнки, и ближние, равные толщине α -плёнки. Как будет показано ниже, прочность дальних коагуляционных контактов достигает 10^{-10} Н, ближних — 10^{-9} – 10^{-8} Н.

Второй тип контактов формируется по мере уплотнения глинистых пород в водонасыщенном состоянии или их частичного обезвоживания при высушивании. Под влиянием внешних и внутренних факторов на отдельных неровностях (выступах) контактирующих поверхностей происходит продавливание (разрушение) гидратных граничных плёнок. В результате на небольших площадках непосредственного соприкосновения частиц (см. рис. 9, б) образуются новые, *точечные* (по терминологии П.А. Ребиндера), контакты. Это получается за счёт “холодной спайки” частиц или образования ионно-электростатических связей, подобных тем, какие существуют между слоями в структурах глинистых минералов. Поведение контактов определяется как расклинивающим действием гидратных плёнок (на коагуляционных участках контакта), так и более прочными силами химической и ионно-электростатической природы (в местах непосредственного соприкосновения частиц). Поэтому образующиеся таким путём контакты были названы *переходными* [20]. Их формированию способствует неоднородность рельефа поверхности их частиц.

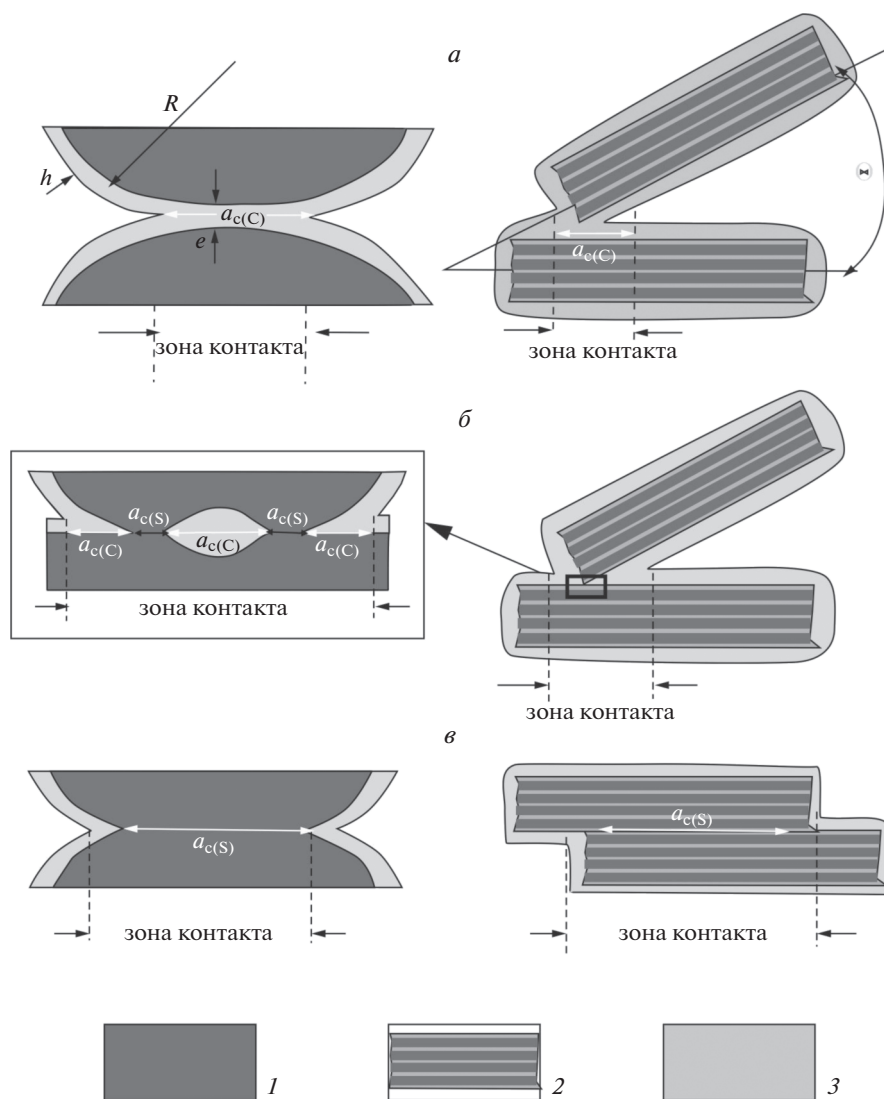


Рис. 9. Типы контактов

a – коагуляционные; *б* – переходные точечные; *в* – фазовые; 1, 2 – частицы; 3 – плёнка адсорбированной воды; $a_c(c)$ – участки коагуляционных контактов; $a_c(s)$ – участки фазовых контактов

На выступах водные плёнки могут прорываться, образуя фазовые участки контакта, а в углублениях, наоборот, сохраняются коагуляционные зоны. Расчёты показали, что прочность единичного переходного контакта может изменяться от 5×10^{-8} до 3×10^{-7} Н [26].

В процессе цементации или роста геостатического давления и температуры происходит образование наиболее прочных *фазовых контактов* (см. рис. 9, *в*). В их основе лежат ионно-электростатические и химические силы, под влиянием которых глинистые частицы трансформируются в более крупные ультра- и микроагрегаты – кристаллиты. По своей природе такие контакты подобны границам зёрен в поликристаллическом

теле [27]. Фазовые контакты распространены в сцементированных глинистых породах, аргиллитах, алевролитах, глинистых сланцах, представляющих собой типичные твёрдые тела, упруго деформирующиеся при приложении внешних нагрузок и хрупкие при достижении предельной прочности. Фазовые контакты практически не гидратируются, что обуславливает их водостойкость и полную потерю способности пород к набуханию.

Рассмотренные типы контактов формируются в ходе длительной геологической истории под воздействием внешних факторов, прежде всего гравитационного давления вышележащих пород, от которого зависит степень литификации. Процесс протекает при нагрузке до 20–30 МПа. Если

в дальнейшем нагрузка увеличивается, коагуляционные контакты постепенно превращаются в уплотнённые глины с переходными контактами и полутвёрдой консистенцией. При напряжениях 60–80 МПа формируются фазовые контакты, характерные для плотных сцементированных глинистых пород, аргиллитов и алевролитов [20].

Таким образом, роль расклинивающего действия гидратных плёнок зависит от степени литификации пород и постепенно снижается при переходе от пород с коагуляционными контактами к породам, в которых преобладают фазовые контакты. У последних расклинивающее давление отсутствует либо минимально.

Количество контактов. Для оценки количества контактов на единицу площади горизонтальной поверхности разработано несколько расчётных схем — моделей дисперсного пористого тела. Число контактов в этих моделях определяется размером и формой частиц, способом их укладки и тесно связано с пористостью. Чем мельче частицы и плотнее их упаковка, тем больше контактов на единицу площади.

Для описания глинистых пород, сложенных анизометричными частицами плоской формы, применялась модель “перекашивающегося карточного домика” [26]. В её основу положены представления о карточном домике, стенками которого являются тонкие диски, имитирующие пластинчатые глинистые частицы или листообразные микроагрегаты, контактирующие между собой. Для определения степени уплотнённости пород используется параметр q — среднее значение угла между частицами, а также оценивается число контактов на поверхности разрушения и в зависимости от среднего угла между глинистыми частицами. Расчёты, проведенные В.Н. Соколовым, показали, что для современного ила Каспийского моря количество контактов $\chi^q = 6.9 \times 10^7$ на см^2 . В то же время для морской хвалынской глины, отобранной в районе Волгограда и имеющей примерно такую же дисперсность, как ил, но более высокую степень уплотнения структурных элементов, $\chi^q = 3.9 \times 10^8$ на см^2 . Для глинистого сланца χ^q возрастает до 4.4×10^8 на см^2 .

Площадь контактов. Площадь коагуляционного контакта двух сферических частиц (a_c) определяется их радиусом (R) и толщиной гидратной плёнки h . Параметр a_c характеризует зону перекрытия гидратных плёнок контактирующих частиц, в пределах которой существует расклинивающее давление.

Согласно расчётам Соколова, площадь контакта двух одинаковых сферических частиц диаметром 1 мкм — $a_c \approx 8 \times 10^4 \text{ нм}^2$ ($\approx 8 \times 10^{-10} \text{ см}^2$) [26]. Площадь контакта двух плоских одинаковых по размеру частиц, расположенных друг к другу под

углом θ , находится иным путём. При $\theta \rightarrow 0$, когда пластинки расположены параллельно и полностью перекрывают друг друга, площадь контакта будет обусловлена размерами перекрывающих частиц. Для частиц не более 1 мкм она составит около 10^6 нм^2 (10^{-8} см^2). При $\theta \rightarrow 90^\circ$, когда частицы располагаются перпендикулярно друг к другу, площадь контакта минимальная — около $1.6 \times 10^5 \text{ нм}^2$ ($1.6 \times 10^{-9} \text{ см}^2$).

Прочность контактов. Помимо количества контактов на единицу площади, необходимо знать прочность образующихся единичных коагуляционных контактов. Её принято оценивать испытанием на разрыв. При одновременном разрыве тела прочность индивидуального контакта находится из выражения:

$$Pi = P_C / X,$$

где: P_C — прочность тела на разрыв; X — количество контактов на единицу площади разрыва. На основе опытов и расчётов, выполненных В.Н. Соколовым, получены значения Pi между глинистыми частицами размеров 1 мкм для дальних коагуляционных контактов, равные 10^{-10} Н , а для ближних коагуляционных контактов — $10^{-9} - 5 \times 10^{-8} \text{ Н}$. Кроме того, сцепление зависит от рН раствора и содержания в нём солей: в щелочной среде и с повышением солей притяжение частиц может увеличиваться.

МОДИФИКАЦИЯ ТЕОРИИ К. ТЕРЦАГИ

Напряжения, возникающие в грунтах, — сложная функция внешних воздействий и внутренних процессов, выходящая далеко за пределы простого учёта прилагаемой нагрузки и оценки порового давления. В теории К. Терцаги не учитываются физико-химические процессы на границе минерал–вода, приводящие к образованию на поверхности частиц тонкой плёнки адсорбированной воды и появлению на контактах расклинивающего давления. Это давление создаёт внутреннее напряжение, которое, как и внешнее, передаётся на скелет грунта и влияет на его прочность. Поэтому напряжённое состояние глинистых грунтов представляет собой функцию нескольких факторов: общего напряжения, прилагаемого к грунту; порового давления воды; расклинивающего давления гидратных плёнок на контактах частиц. Получаемую при учёте всех трёх факторов величину следует называть *суммарным (истинным) эффективным напряжением*.

Данные по расклинивающему действию тонких плёнок воды позволяют модифицировать теорию эффективных напряжений Терцаги применительно к глинистым грунтам. Реальное эффективное напряжение для них будет определяться из следующего выражения [28]:

$$\sigma'' = \sigma - \sigma_p - u', \quad (3)$$

где: σ'' — суммарное (истинное) эффективное напряжение; σ — внешнее давление; u' — активное поровое пространство, в котором формируется поровое давление, получаемое путём вычета из общего объёма пор объёма тех из них, которые заняты адсорбированной водой; σ_p — расклинивающее давление тонких плёнок адсорбированной воды, которое находится по формуле:

$$\sigma_p = \chi P(h) a_c, \quad (4)$$

где: χ — количество коагуляционных контактов на единицу площади поверхности; $P(h)$ — расклинивающее давление на коагуляционном контакте; a_c — площадь коагуляционного контакта.

Тогда прочность дисперсных систем будет определяться как:

$$\tau = \operatorname{tg} \phi (\sigma - \sigma_p - u') + c. \quad (5)$$

В выражение (5) вошли два новых параметра, отсутствующие в формуле Терцаги. Первый — $\chi P(h) a_c$ — характеризует внутреннее напряжение, возникающее в результате расклинивающего действия плёнок. В наибольшей степени он проявляется во влажных глинах с коагуляционными контактами, в которых они широко распространены и существенно влияют на внутреннее напряжение системы. При переходе к уплотнённым и высоколитифицированным глинистым образованиям эффект гидратных плёнок ослабевает и полностью исчезает. Второй параметр (u') отражает давление в порах, занятых свободной водой. Для нахождения u' необходимо из общего объёма вычесть объём пор, занятых адсорбированной водой.

Модификация формулы К. Терцаги позволяет использовать теорию реальных эффективных напряжений при оценке не только прочности, но и ряда важнейших свойств грунтов, в частности, способности тонких минеральных частиц находиться в устойчивом состоянии в водной среде. Поверхностные плёнки стимулируют расклинивающее действие на контактах частиц и противостоят молекулярным силам притяжения, стремящимся вызвать коагуляцию и укрупнение структурных элементов.

Другая специфическая особенность глин — их пластичность, обусловленная наличием на контактах тонких плёнок адсорбированной воды, обладающей вязким трением. При отсутствии таких плёнок свободная вода легко отжимается из контактной зоны и не препятствует образованию сухого контакта между взаимодействующими частицами. Соответственно, исчезает эффект вязкого трения, а вместе с ним — пластичность всей системы. Ранее уже упоминалось о такой специфической особенности глинистых формаций, как

давление набухания при увлажнении. Это непосредственный результат расклинивающего действия гидратных плёнок. Указанные процессы развиваются при взаимодействии минералов с водой даже при неизменности внешнего напряжения.

Применение теории реальных эффективных напряжений с учётом внешних и внутренних источников энергии позволит повысить точность вычислений и расширить возможности базового уравнения механики грунтов для расчёта прочности и других свойств дисперсных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физико-химическая механика природных дисперсных систем / Под ред. Е.Д. Шукина, Н.В. Перцева, В.И. Осипова, Р.Н. Злочевской. М.: Изд-во Московского университета, 1985.
2. Ravina J., Low P.F. Relation between swelling, water properties and b-dimension in montmorillonite-water systems // *Clays and clay minerals*. 1972. V. 20. P. 109–123.
3. Дерягин Б.В., Кусаков М.М. Свойства тонких слоёв жидкостей // *Известия АН СССР. Серия химическая*. 1936. № 5. С. 741–753.
4. Read A.D., Kitchener J.A. Wetting films of silica // *J. Colloid and Interface Sci.* 1969. № 3. P. 391–398.
5. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Изотерма расклинивающего давления плёнок воды на поверхности кварца // *Доклады АН СССР*. 1972. № 3. С. 572–575.
6. Дерягин Б.В., Обухов Е.В. Аномальные свойства тонких слоёв жидкости. Ультрамикроскопические исследования лиосфер (солевых оболочек) и элементарного акта набухания // *Коллоидный журнал*. 1935. Т. 1. С. 385–398.
7. Дерягин Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких плёнок. М.: Наука, 1986.
8. Злочевская Р.И. Связанная вода в глинистых грунтах. М.: Изд-во МГУ, 1969.
9. Связанная вода в дисперсных системах. Вып. 4. М.: Изд-во МГУ, 1977.
10. Поверхностные плёнки воды в дисперсных структурах / Под ред. Е.Д. Шукина. М.: Изд-во МГУ, 1988.
11. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Смачивающие плёнки. М.: Наука, 1984.
12. Осипов В.И. Наноплёнки адсорбированной воды в глинах, механизм их образования и свойства // *Геоэкология*. 2011. № 4. 291–305.
13. Краснушкин А.В., Квилидзе В.И., Ядынина И.В. К вопросу о растворяющей способности связанной воды // *Связанная вода в дисперсных системах*. 1980. № 5. С. 99–104.
14. Зорин З.М., Соболев В.Д., Чураев Н.В. Изменение капиллярного давления поверхностного натяжения и вязкости жидкости в кварцевых микрокапиллярах // *Поверхностные силы в тонких плёнках и дисперсных системах*. М.: Наука, 1972. С. 214–221.

15. Квилидзе В.И., Краснушкин А.В., Злочевская Р.И. Свойства поверхностных плёнок и слоёв воды // Поверхностные плёнки воды в дисперсных структурах. М.: Изд-во МГУ, 1988. С. 48–67.
16. Осипов В.И., Карпенко Ф.С., Румянцева П.Н. Активная пористость и её влияние на физико-механические свойства глинистых грунтов // Геоэкология. 2014. № 3. С. 262–269.
17. Дерягин Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких плёнок. М.: Наука, 1986.
18. Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Кальбергенов Р.Г. Влияние расклинивающего действия гидратных плёнок на прочностные свойства глинистых грунтов // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология. 2018. № 4. С. 68–74.
19. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1969.
20. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. М.: ГЕОС, 2013.
21. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. М.: Знание, 1958.
22. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966. С. 3–16.
23. Шукин Е.Д., Перцев А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. М.: Изд-во МГУ, 1982.
24. Соколов В.Н. Физико-химические аспекты механического поведения глинистых грунтов // Инженерная геология. 1985. № 4. С. 28–41.
25. Яминский В.В., Пчелин В.А., Амелина Е.А., Шукин Е.Д. Коагуляционные контакты в дисперсных системах. М.: Химия, 1982.
26. Соколов В.Н. Модели микроструктур глинистых грунтов // Инженерная геология. 1991. № 6. С. 32–40.
27. Осипов В.И., Соколов В.Н. Роль ионно-электростатических сил в формировании структурных связей глин // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 1974. № 1. С. 16–22.
28. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Геоэкология. 2013. № 1. С. 3–24.

THIN FILMS OF ADSORBED WATER AND THEIR INFLUENCE ON EFFECTIVE TENSION IN CLAYEY SOILS

V. I. Osipov^{1, #}

¹*Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: osipov@geoenv.ru*

Examples of the discrepancy between the calculation of the strength of fine-grained soils based on the Mohr–Coulomb theory and actual data are considered. The main reason for the discrepancy is the estimation of the effective stress of soils according to the formula of K. Terzaghi, which does not take into account the internal stresses that occur at the contacts of the particles when the surface films of adsorbed water overlap. It is proposed to modify the theory of K. Terzaghi and switch to the using of general (external and internal) stresses.

Keywords: effective stresses, adsorbed water, thin films of adsorbed water, disjoining action of thin films, internal and external stresses.