
ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.4

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА ДИСПЕРСНЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ – НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

© 2024 г. В. И. Осипов^{1,*}, В. Н. Соколов^{2,**}, Ф. С. Карпенко^{1,***}

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук,
Уланский пер. 13, стр.2, Москва, 101000 Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1, Москва, 119991 Россия

*E-mail: osipov@geoenv.ru

**E-mail: sokolov@geol.msu.ru

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

Поступила в редакцию 24.10.2023 г.

После доработки 30.01.2024 г.

Принята к публикации 03.06.2024 г.

Приводятся данные о несоответствии теоретических расчетов и экспериментальных результатов оценки прочности тонкодисперсных образований, к которым относятся глинистые породы. Рассматриваются физико-химические процессы на поверхности дисперсных частиц при взаимодействии воды и образование пленок адсорбированной воды, проявляющих расклинивающее давление. Наличие пленок и их расклинивающее действие обуславливают формирование в ходе литогенеза различных типов контактов между частицами грунта: коагуляционных, переходных, фазовых. Образующиеся контакты являются важнейшими факторами поведения глинистых пород. В работе рассматриваются влияние типов контактов на состояние, деформируемость и устойчивость глинистых пород при внешних воздействиях. Сделан вывод, что оценка поведения глинистых пород должна базироваться на физико-химической механике, закономерностях контактных взаимодействий в дисперсных грунтах и статистическом анализе экспериментальных определений показателей механических свойств глинистых грунтов.

Ключевые слова: адсорбированная вода, структурированные и диффузные пленки воды, расклинивающее давление, изотерма расклинивающего давления, коагуляционный, смешанный и фазовый типы контактов, внешние и внутренние напряжения

DOI: 10.31857/S0869780924040059 EDN: SFSRTK

ВВЕДЕНИЕ

Описание механических свойств грунтов в настоящее время основывается на принципах классической механики, опирающихся на явление упругого деформирования твердых тел. На основе этих представлений широкое применение нашли теории предельного состояния грунтов (теория Мора-Кулона) и эффективных напряжений (теория К. Терцаги). В обоих случаях деформирование и прочность рассматриваются как упругие процессы, происходящие внутри структурных (минеральных) элементов и обусловленные их составом и наличием структурных несовершенств в виде дислокаций, вакансий и других неоднородностей. Происходящие изменения характеризуются показателями прочности и деформации, в качестве которых используются сопротивление сдвигу – угол внутреннего трения и сцепление,

и сжимаемость (модуль сжатия). Обе теории вошли в практику в качестве теоретической основы оценки прочности грунтов, а угол внутреннего трения как основной показатель механических свойств дисперсных грунтов, оцениваемых при изысканиях под строительные проекты.

Основными факторами, влияющими на механическое поведение грунта, согласно теории Мора-Кулона и К. Терцаги, считаются его минеральный состав, а также геометрические особенности слагающих элементов – частиц (размер, форма, окатанность и т.д.). При этом считается, что угол внутреннего трения и сцепление для каждого грунта при оценке его прочности на сдвиг остаются неизменными во всем диапазоне прилагаемых напряжений, а огибающая кривая предельного напряжения представляет собой прямую линию (рис. 1а).

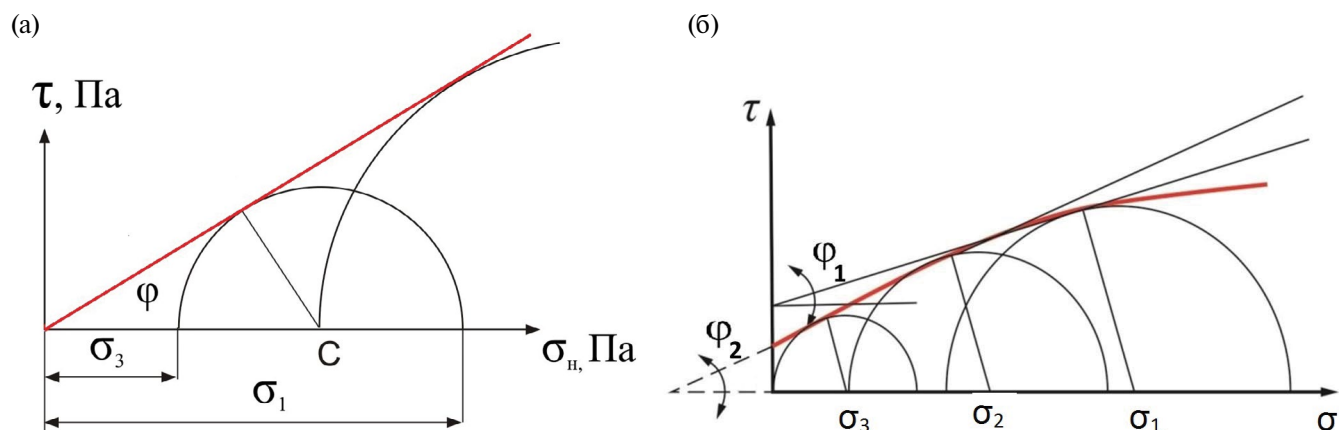


Рис. 1. Диаграмма сдвига, построенная в соответствии с теорией Мора-Кулона, для песчаного грунта (а) и полученная по экспериментальным данным для глин (б, красная линия).

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

Криволинейность огибающей кривой для глинистых грунтов указывает на изменчивость угла внутреннего трения и сцепления в зависимости от напряженного состояния. Это свидетельствует о несоответствии экспериментальных данных теоретическим. Причина несоответствия заключается в том, что теория не отражает в полной мере свойства глинистых систем и природу процессов, происходящих при их деформировании. Это относится, прежде всего, к влажным глинистым грунтам.

Отклонение экспериментальных результатов от теоретических расчетов, основанных на принципах классической механики, послужило причиной формирования принципов другой механики, а именно физико-химической механики, которую можно рассматривать как новый подход к определению механических свойств дисперсных материалов, включая грунты.

Изучение физико-химических процессов, применительно к тонкодисперсным пористым системам, получило развитие в России благодаря исследованиям академиков П.А. Ребиндера [20], Б.В. Дерягина [2, 3, 6], а также их многочисленных учеников, создавших новое междисциплинарное научное направление, — “физико-химическую механику пористых тел” [1, 10, 14, 18, 21, 27, 29]. Это направление объединило современные

достижения в области молекулярной физики, коллоидной химии и классической механики.

Влияние физико-химических факторов, таких как влажность, поверхностные активные вещества, температура и др. на механические свойства дисперсных структур проявляется в тем большей степени, чем более развита межфазная внутренняя поверхность пористого тела. Поэтому глинистые породы, обладающие развитой поверхностью, относятся к типичным объектам, к которым применима физико-химическая механика. Среди внутренних факторов, влияющих на состояние тонкодисперсных пористых тел, наибольшее значение имеют адсорбция воды и развитие контактных взаимодействий.

АДСОРБИРОВАННАЯ ВОДА В ГЛИНАХ

Образование пленок адсорбированной воды

Глинистые минералы активно взаимодействуют с молекулами воды с образованием на поверхности пленки адсорбированной воды (рис. 2). *Адсорбированной считается тонкая пленка воды, образующаяся под действием поверхностных сил минералов или других твердых тел и обладающая специфической структурой и свойствами.*

При адсорбции возникает два вида адсорбированной воды (рис. 3). Первый вид — структурированный слой, образующийся непосредственно на поверхности минерала за счет адсорбции молекул воды из воздуха и удержании их в физически связанном состоянии. Адсорбция воды на поверхности минералов приводит к образованию некоторого количества слоев адсорбируемых молекул, формирующих структурированный слой гидратной пленки.

В основе образования поверхностной структурированной пленки лежит взаимодействие между молекулами воды и силикатной поверхностью

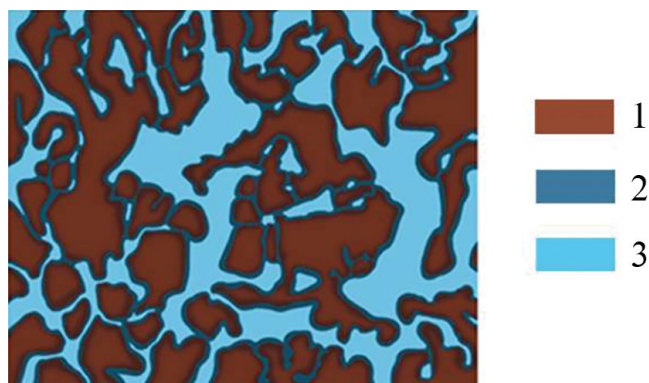


Рис. 2. Пленка адсорбированной воды в глинах: 1 — поверхность минерала, 2 — пленка адсорбированной воды, 3 — поровое пространство, заполненное свободной водой.

минералов, а также молекул воды внутри адсорбционного слоя. В результате донорно-акцепторной связи между одним из протонов молекулы воды и кислородом октаэдрической сетки минерала формируется связующий мостик между силикатной поверхностью и молекулами граничного слоя адсорбированной воды.

На формирование пленки структурированной адсорбированной воды большое влияние оказывает строение поверхностного слоя минерала. Адсорбция молекул воды может рассматриваться с позиции эпитаксиального наращивания слоя структурированной граничной пленки на поверхности минерала путем наложения слоев воды на структурную сетку минерала. Реальные структуры слоистых силикатов имеют дитригональный мотив кислородной ячейки, который несколько меньше размера ячейки свободной воды.

При взаимодействии минерала и воды реализуется эпитаксиальный механизм — постепенное приспособление структуры воды к структуре минерала путем последовательных трансформаций водородных связей. При этом возникающие на границе минерал-вода напряжения распространяются как внутрь кристалла, так и внутрь слоя адсорбированной воды, вызывая изменение ее структуры и оказывая влияние на ее свойства.

Прямое определение толщины пленки структурированной адсорбированной воды осуществлено Б.В. Дерягиным и М.М. Кусаковым [3], Б.В. Дерягиным и Н.В. Чураевым [5], A. Read, J.A. Kitchener [32], M. Fukue, T. Minato, N. Taya, T. Chida [30] при изучении абсорбции водяного пара на плоских поверхностях стекла, кварца и слюды с одновременным эллипсометрическим измерением толщины образующейся полимолекулярной пленки. Полученные данные свидетельствуют, что толщина пленки первой разновидности адсорбированных молекул воды (структурированного слоя) на глинистых минералах в зависимости от их

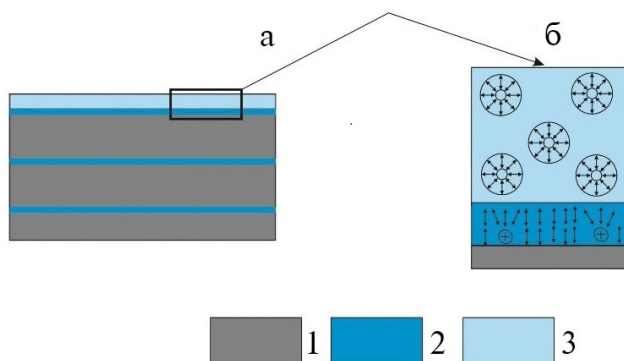


Рис. 3. Строение пленки адсорбированной воды на поверхности частиц глинистых минералов: 1 — поверхность минерала, 2 — структурно ориентированная адсорбированная вода, 3 — диффузная адсорбированная вода.

структуры и химического состава изменяется от 0.3 до 7.2 нм. У различных каолинитов она составляет 3.4–3.7 нм, у монтмориллонитов 0.3–0.5 нм. Несмотря на это общий объем структурированной части адсорбированной воды у монтмориллонитов намного больше, чем у каолинита, за счет подвижности структуры и большой площади адсорбирующих поверхностей.

При повышении влажности выше максимальной гигроскопической в грунтах развивается другой механизм образования адсорбированной воды за счет координационной связи молекул воды гидратных оболочек обменных катионов, приводящий к образованию адсорбированного слоя *воды диффузных гидратных оболочек* (см. рис. 3). Адсорбированная вода диффузных гидратных оболочек не образует какой-либо структурной сетки. Тем не менее, она также, как и вода структурно-ориентированной пленки, находится под влиянием электростатического поля частиц и обладает специфическими свойствами.

Толщина слоя воды диффузных оболочек обменных катионов значительно больше и зависит от валентности катионов и их концентрации. В зависимости от этих факторов толщина пленки молекул воды диффузных оболочек изменяется от 50 до нескольких сот нанометров.

Таким образом, структура гидратной пленки, образующейся в дисперсных системах, включает две разновидности адсорбированной воды: полимолекулярный слой структурированной воды, формирующийся за счет молекулярных сил непосредственно на поверхности минерала, и диффузный слой воды гидратированных катионов, отошедших от его поверхности (см. рис. 3).

Свойства пленок адсорбированной воды

Впервые внимание на существование специфических свойств у пленок адсорбированной воды обратил Б.В. Дерягин с соавторами [3, 4].

В последующие годы изучение свойств нанопленок стало предметом многочисленных исследований отечественных и зарубежных ученых [7, 13, 16, 21, 25, 27, 30–32].

Наличие в таких пленках анизотропного напряжения, обусловленного деформацией водородных связей и образованием диффузных гидратных оболочек катионов, предопределяет их специфические гидродинамические свойства: они не передают порового давления и не обладают взвешивающим эффектом. Кроме того, вода в пленках отличается по растворяющей способности, теплофизическим, диэлектрическим и другим свойствам от аналогичных показателей свободной воды. Было установлено, например, что растворяющая способность воды в нанопленках более чем в 10 раз ниже по сравнению со свободной водой [11].

Интерес представляют структурно-механические свойства нанопленок, прежде всего, их вязкость. Установлено, что вода в тонких пленках обладает повышенной вязкостью по сравнению с обычной водой [6]. Это хорошо подтверждается ее поведением в тонких капиллярах, сечение которых перекрывается адсорбированной водой. Вязкость начинает повышаться в капиллярах радиусом <100 нм, а в капиллярах радиусом ~ 30 нм она оказывается в 1.5 раза выше вязкости свободной воды (рис. 4). С повышенной вязкостью воды нанопленок связано наличие в тонкодисперсных глинах начального градиента фильтрации.

Следует отметить, что изменения структуры и свойств характерны только для полярных жидкостей, подобных воде; в то время как в неполярных жидкостях, таких как четыреххлористый углерод, подобных изменений не происходит (см. рис. 4).

Структурированная пленка адсорбированной воды проявляет сильную температурную зависимость как в области положительных, так

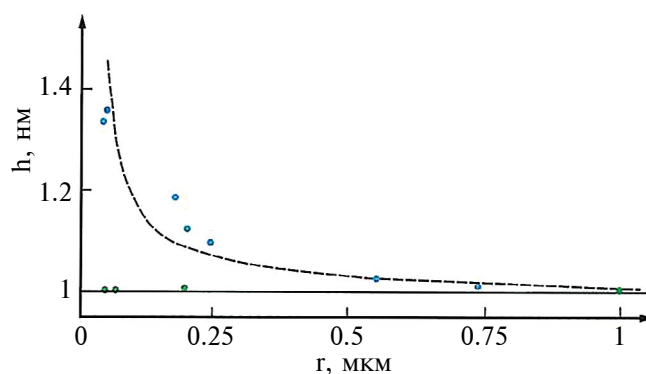


Рис. 4. Зависимость относительной вязкости воды (пунктир) и неполярной жидкости CCl_4 (сплошная линия) от радиуса кварцевых капилляров [7].

и отрицательных температур. Прямые измерения толщины такой пленки при различных температурах свидетельствуют, что она уменьшается при повышении температуры. Структура пленки при достижении $65^\circ C$ разрушается под влиянием теплового движения молекул, и она полностью исчезает (рис. 5а). Фазовый переход адсорбированной воды в лед происходит при более низких (отрицательных) температурах по сравнению со свободной водой, с уменьшением толщины пленки температура ее замерзания снижается (рис. 5б).

Поровое пространство, занятое пленками адсорбированной воды, обычно относится к общей пористости грунта. В то же время пленки, обладающие специфическими гидродинамическими свойствами, не реагируют на сжимающее напряжение. Поэтому сжимаемость грунтов следует определять с учетом не общей, а активной пористости. Учет этого фактора может привести к изменению коэффициента сжимаемости у легких суглинков до 2%, а тяжелых глин – до 8% [15].

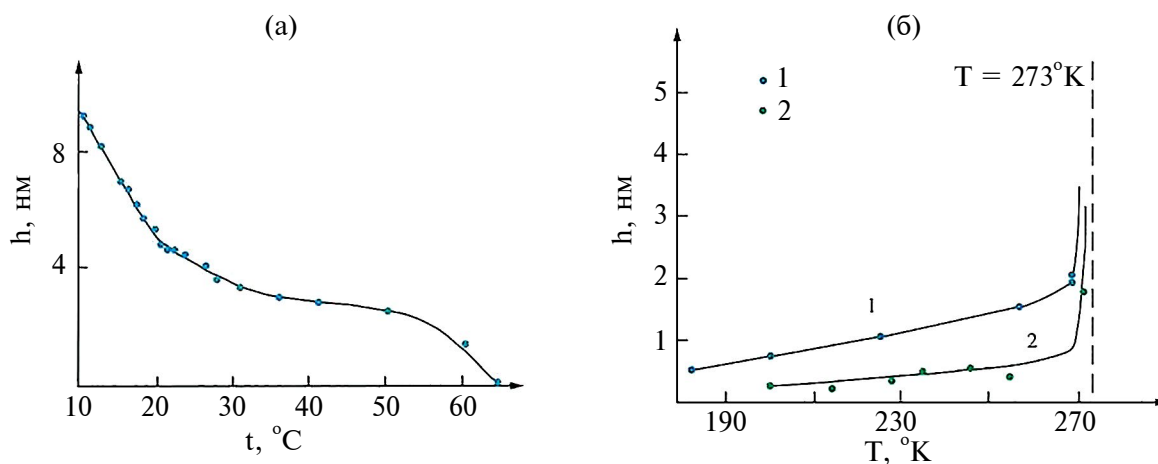


Рис. 5. Зависимость толщины пленки (h) адсорбированной воды: а – на кварце от температуры [6]; б – незамерзшей воды от температуры (T , °K), на поверхности Са-каолинита (1) и Na-монтмориллонита (2) [3].

Расклинивающее действие пленок адсорбированной воды

При сближении частиц происходит перекрытие пленок адсорбированной воды, сопровождающееся изменением свободной энергии Гиббса, между частицами возникают силы отталкивания (рис. 6).

Силы отталкивания, образующиеся между пленками адсорбированной воды при их перекрытии, получили название *расклинивающего давления*. Благодаря наличию таких сил объясняются существование дисперсных систем в природе и предотвращение в них коагуляции и агрегации (укрупнения) дисперсной фазы (минеральных частиц). Этим же объясняется появление давления в глинах при гидратации и отсутствии возможности изменения их объема, получившее название *давление набухания*.

Величина расклинивающего давления граничных пленок $\Pi(h)$ определяется вкладом поверхностных сил притяжения и отталкивания различной природы между поверхностью минералов и адсорбированной водой [2–4, 8, 18, 27, 28]. В первом приближении их вклад можно считать аддитивным:

$$\Pi(h) = \Pi_e(h) + \Pi_m(h) + \Pi_s(h), \quad (1)$$

где Π_e – электростатическая составляющая, обусловленная перекрытием диффузных ионных слоев заряженных поверхностей частиц и их отталкиванием; Π_m – молекулярная составляющая, обусловленная дисперсионным взаимодействием твердой подложки через тонкую пленку жидкости и притягиванием частиц; Π_s – структурная составляющая, вызванная перекрытием структурированных слоев адсорбированной воды с измененной структурой, взаимодействующей непосредственно с поверхностью минерала.

Входящие в приведенное выражение молекулярная, электростатическая и структурная компоненты расклинивающего давления действуют одновременно, но изменяются по различным закономерностям. Электростатическая и структурная компоненты – положительные, и препятствуют сближению частиц. Значение электростатической компоненты Π_e определяется величиной заряда минеральной поверхности, она характеризуется наибольшим дальним действием. Поэтому толстые пленки воды в разбавленных электролитах устойчивы. Молекулярная составляющая имеет отрицательное значение и стремится сблизить частицы, проявляясь, как правило, при толщине граничной пленки $\Pi_m < 50$ нм. При толщине пленки < 10 нм ее устойчивость повышается, в основном, за счет структурной компоненты расклинивающего давления Π_s .

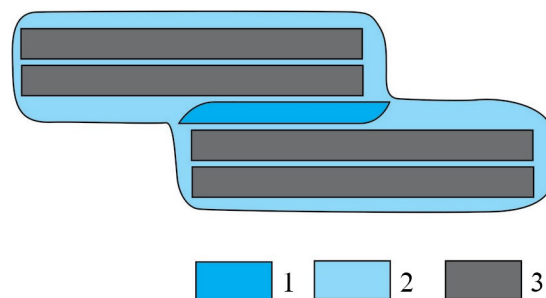


Рис. 6. Образование сил отталкивания между твердыми частицами при перекрытии пленок адсорбированной воды: 1 – зона перекрытия пленок (расклинивающее давление), 2 – адсорбированная вода, 3 – частица.

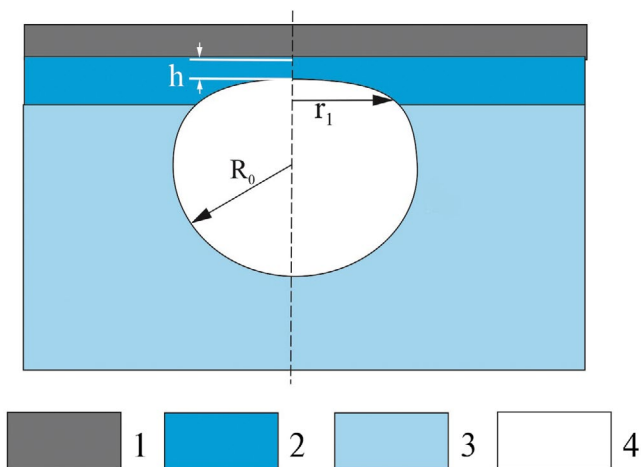


Рис. 7. Пузырьковый метод получения изотермы расклинивающего давления гидратной пленки связанной воды: 1 – твердое тело, 2 – адсорбированная вода, 3 – свободная вода, 4 – пузырек воздуха.

Изотермы расклинивающего давления

Первые данные по определению расклинивающего давления [3] были получены в ходе уникального эксперимента по измерению давления в тонкой гидратной пленке на контакте твердой поверхности с пузырьком воздуха (рис. 7). В эксперименте создавались условия, когда пузырьки воздуха различного радиуса R_0 , всплывая, приближались к твердой поверхности. Всплывший пузырек образовывал с твердой поверхностью контактную площадку радиусом r_1 с толщиной граничной пленки на контакте, равной h . Путем измерения радиуса пузырька и толщины граничной пленки оценивалось граничное давление пленки по капиллярному давлению пузырька $\Delta P_k = 2\sigma_w/R_0$, где σ_w – поверхностное натяжение воды, а ΔP_k – капиллярное давление пузырька, R_0 – радиус пузырька.

Зависимость суммарного действия расклинивающего давления граничной гидратной нанопленки в зазоре между твердыми телами от толщины пленки h получила название *изотермы*

расклинивающего давления [5]. Качественная картина такой зависимости показана на рис. 8. На диаграмме выделяются две ветви величины расклинивающего давления $\Pi(h)$, соответствующие устойчивости α - и β -пленок.

Первая β -ветвь обусловлена расклинивающим действием электростатической составляющей за счет перекрытия диффузных ионных слоев. Вторая (α -ветвь) обусловлена структурной составляющей расклинивающего давления. Максимальные толщины нанопленок h_1 и h_2 , отвечающие α - и β -ветвям изотерм адсорбции, характеризуют термодинамически равновесные состояния, на которых могут фиксироваться взаимодействующие частицы и образовываться объемные структуры.

Иногда β -пленка может самопроизвольно или под влиянием физико-химических факторов переходить в более устойчивое состояние α -пленки. Этот процесс сопровождается преодолением потенциального барьера $\Pi_{\max}$, отвечающего максимуму избыточной свободной энергии пленки при ее толщине h_0 .

Результаты обобщения экспериментальных данных по изучению расклинивающего давления β -пленок в зависимости от их толщины, полученные различными исследователями, дали значения от 0.1×10^4 до 1.4×10^4 дин/см². При благоприятных физико-химических условиях максимальное расклинивающее давление β -пленки при ее максимальной толщине может достигать 3×10^6 дин/см² [5]. При толщине 40–70 нм β -пленка может разрушаться. Уменьшение толщины β -пленки и ее разрушение зависят от концентрации электролита в растворе и ряда других физико-химических факторов (например, понижение pH растворов до изоэлектрического состояния поверхности минерала).

После разрушения β -пленки и приближении ее толщины к 10 нм в результате дальнейшего сближения частиц под влиянием межмолекулярных сил начинают действовать расклинивающие силы молекул воды, адсорбированных на поверхности минерала и образующих α -ветвь расклинивающего давления. Это приводит к новому росту расклинивающего давления и устойчивости пленки (см. рис. 8).

КОНТАКТЫ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

Типы контактов

Передача напряжений и расклинивающее действие пленок в пористых дисперсных системах идут не по всей межфазной поверхности частиц, а только в местах их наибольшего сближения — контактах. Количество и характер индивидуальных контактов — важнейшие характеристики

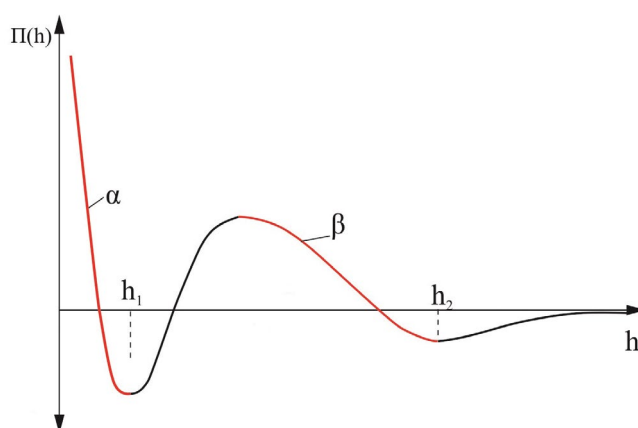


Рис. 8. Интегральная изотерма расклинивающего давления пленки [3].

дисперсных структур, определяющие их деформационные, прочностные и другие свойства.

В зависимости от формы взаимодействующих частиц возможны различные геометрические типы контактов между сферическими, сферическими и плоскими частицами, плоскими частицами. Последние подразделяются на контакты: скол-скол, базис-скол и базис-базис [17].

В энергетическом отношении контакты можно подразделить на три типа: коагуляционные, смешанные (переходные) и фазовые [16, 19, 20, 23, 28] (рис. 9). Образование в породах различных типов контактов идет в процессе литогенеза и определяется величиной напряжения (гравитационного давления), которое испытывают породы в процессе их формирования. Каждый из выделенных типов контактов характеризуется определенным механизмом образования и природой сил, действующих в зоне контактов.

Коагуляционные контакты (рис. 9а) образуются между частицами при сохранении термодинамически устойчивой прослойки адсорбированной воды на контакте [16, 29]. В природных условиях коагуляционные контакты встречаются в водонасыщенных тонкодисперсных отложениях на стадии начального литогенеза, не перенесших заметного уплотнения (илы, слаболитифицированные глинистые осадки, глины пластичной или текучей консистенции и другие дисперсные системы). Важную роль в их образовании играют пленки адсорбированной воды. Термодинамически устойчивое состояние коагуляционных контактов создается при определенных толщинах граничной пленки, отвечающих α - и β -ветвям изотермы адсорбции, когда расклинивающие силы пленок уравнивают силы притяжения частиц.

Коагуляционные контакты принято подразделять на две разновидности: дальние и ближние. Первые возникают при обеспечении устойчивости контакта за счет β -ветви изотермы адсорбции,

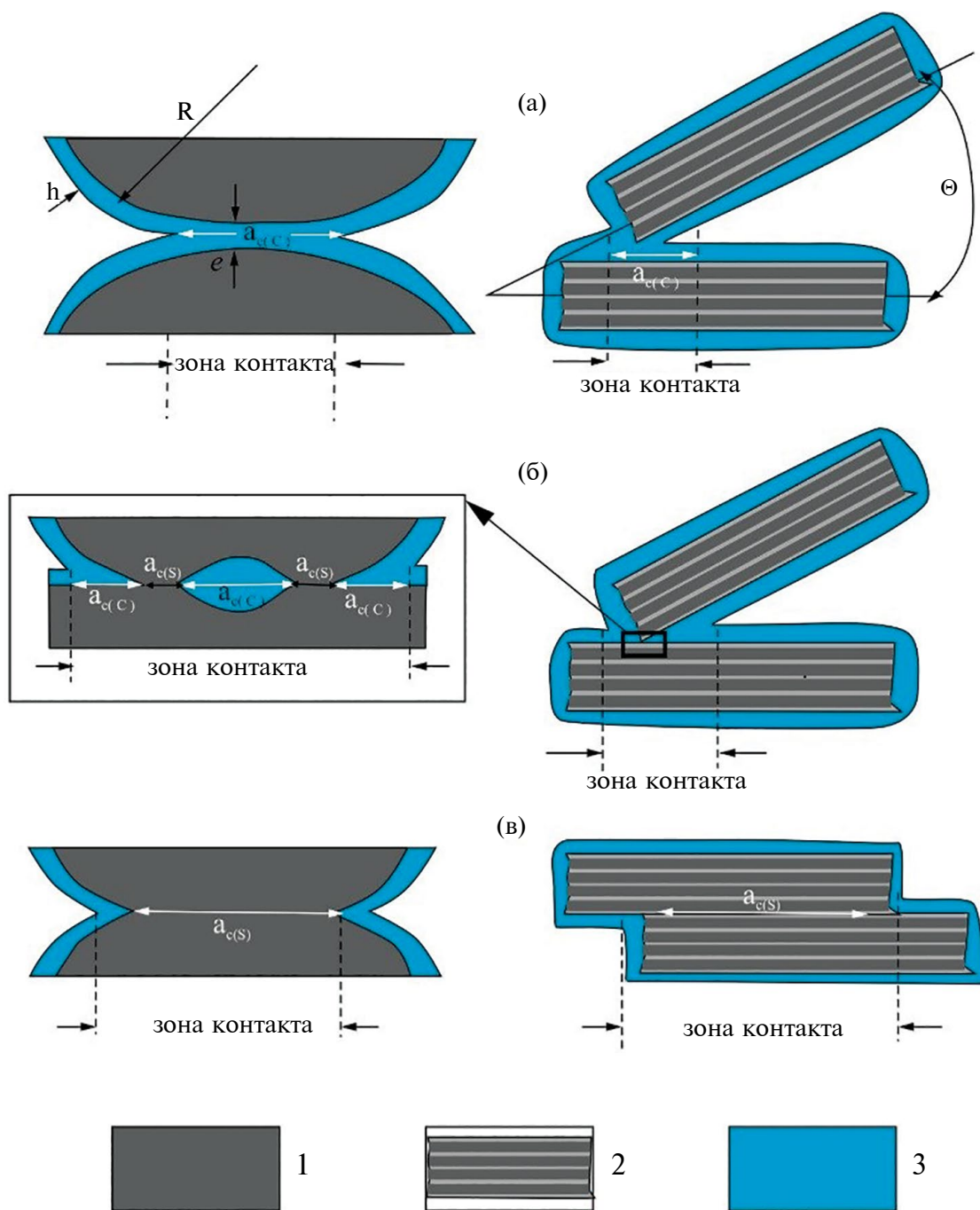


Рис. 9. Типы контактов: коагуляционные (а), смешанные (б) и фазовые (в). 1, 2 – частицы, 3 – пленка адсорбированной воды. Участки контактов: $a_{c(C)}$ – коагуляционных, $a_{c(S)}$ – фазовых.

а вторые за счет α -ветви изотермы. Прочность дальних контактов достигает 10^{-10} Н, а ближних – 10^{-9} – 10^{-8} Н [24].

Второй тип контактов (рис. 9б) 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 пленок. В результате на небольших площадках непосредственного соприкосновения частиц образуются точечные контакты (по терминологии П.А. Ребиндера), за счет “холодной спайки” частиц или образования ионно-электростатических связей, подобно тем, какие существуют между слоями в структурах глинистых минералов. Поскольку поведение таких контактов определяется как расклинивающим действием гидратных пленок (на коагуляционных

участках контакта), так и более прочными силами химической и ионно-электростатической природы (на участках непосредственного соприкосновения частиц), то они были названы смешанными (или переходными) [18]. Образованию переходных контактов способствует неоднородность микрорельефа поверхности дисперсных минеральных частиц: на выступах водные пленки могут прорываться с образованием участков с фазовыми контактами, а в углублениях, наоборот, сохраняются коагуляционные участки. Расчеты показывают, что прочность единичного переходного контакта может изменяться от 5×10^{-8} до 3×10^{-7} Н [24].

При цементации отложений или росте геостатического давления и температуры происходит образование наиболее прочных фазовых контактов (рис. 9в). В основе этого вида контактов лежат силы ионно-электростатической и химической природы, под влиянием которых глинистые частицы трансформируются в более крупные глинистые ультра- и микроагрегаты – кристаллиты. Образующиеся контакты по своей природе подобны границам зерен в поликристаллическом теле. Фазовые контакты распространены в сцементированных глинистых породах, аргиллитах, алевролитах, глинистых сланцах, являющихся типичными твердыми телами, упруго деформируемыми при приложении внешних нагрузок и хрупко разрушающимися при достижении предельной прочности. Фазовые контакты практически не гидратируются, что обуславливает их водостойкость и полную потерю способности пород к набуханию. Прочность фазовых контактов $>3 \times 10^{-7}$ Н [24].

Рассмотренные выше типы контактов формируются в ходе длительной геологической истории. Образование их определяется внешними факторами, прежде всего, гравитационным давлением вышележащих пород, от которого зависит степень литификации. Образование коагуляционных контактов идет до 20–30 МПа нагрузки. При дальнейшем повышении нагрузки идет постепенный переход к глинам полутвердой консистенции со смешанными контактами. При напряжениях, приближающихся к 60–80 МПа, формируются фазовые контакты, характерные для сцементированных глинистых пород, аргиллитов и алевролитов [16].

Таким образом, рассмотрение типов контактов показывает, что роль расклинивающего действия гидратных пленок 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 гидратных пленок отсутствует или имеет минимальное значение.

Влияние типов контактов на механические свойства глинистых грунтов

В процессе литогенеза и формирования различных типов контактов существенные изменения претерпевают консистенция, деформируемость, прочность и другие свойства глинистых образований.

Деформирование грунтов с дальними коагуляционными контактами носит нелинейный вязко-текучий характер. Даже при малых напряжениях их прочность медленно возрастает, а при преодолении условного статического предела становится практически неизменной. Важной особенностью таких структур являются их тиксотропные свойства, т.е. разрушение при преодолении величины прочности и разжижение с последующим восстановлением при прекращении внешнего воздействия.

Грунты с ближними коагуляционными контактами при деформировании проявляют также нелинейный характер, но обладают ясно выраженными свойствами пластичности. При неизменном напряжении пластическое деформирование может достигать значительной величины без разрыва сплошности и незначительном изменении прочности. Это объясняется тем, что в процессе деформирования часть контактов разрушается, но вместо них возникают контакты с другими частицами. В результате происходит пластическое деформирование, а прочность остается практически неизменной, поскольку количество контактов не изменяется. Некоторое снижение прочности может наблюдаться в связи с переориентацией частиц в зоне сдвига.

При дальнейшем повышении напряжений на отдельных участках контакта происходит отжатие молекул адсорбированной воды и образование “сухих” (фазовых) контактов. Появление фазовых контактов наряду с коагуляционными сопровождается переходом грунта в структуру с переходными контактами. Поэтому грунты с переходными контактами проявляют особенности смешанного (упругого и пластического) деформирования, при котором идет непрерывное нарастание деформации и прочности, переходящее после разрушения фазовых контактов в остаточную (пластичную) деформацию с более низкой прочностью.

Глинистые породы с фазовыми контактами ведут себя как упругодеформируемые системы с хрупким разрушением.

В соответствии с поведением глинистых пород в зависимости от типа контактов идет изменение их важнейших свойств и показателей, знание которых важно при решении различных научных и практических вопросов их использования, как объектов окружающей среды. Наиболее распространенные показатели свойств грунтов, полученные авторами, применительно к структурам с различным типом контактов показаны в табл. 1 [8, 9].

Таблица 1. Взаимосвязь показателей свойств глинистых пород с типами контактов

Тип контакта	Характерные свойства
Дальний коагуляционный ($p_i = 10^{-10}$ Н)	Плотность $\rho = 0.3\text{--}1.20$ г/см ³ Прочность на раздавливание $\sigma_p = 0.02\text{--}0.05$ МПа Общий модуль деформации $E_o = 0.5\text{--}1.0$ МПа Вязкость ненарушенной структуры $10^7\text{--}10^8$ Па×с Сцепление <0.01 МПа Угол внутреннего трения $0^\circ\text{--}7^\circ$
Ближний коагуляционный ($p_i = 10^{-9}\text{--}5 \times 10^{-8}$ Н)	Плотность $\rho = 0.9\text{--}1.65$ г/см ³ Прочность на раздавливание $\sigma_p = 0.03\text{--}0.5$ МПа Пластическая прочность $p_m = 0.03\text{--}0.5$ МПа Модуль деформации: – упругой $E = 1.0\text{--}30$ МПа – общей $E_o = 0.1\text{--}10$ МПа Вязкость ненарушенной структуры $10^8\text{--}10^{12}$ Па×с Сцепление $0.01\text{--}0.05$ МПа Угол внутреннего трения $5^\circ\text{--}22^\circ$
Смешанный (переходный) ($p_i = 5 \times 10^{-8}\text{--}3 \times 10^{-7}$ Н)	Плотность $\rho = 1.66\text{--}2.20$ г/см ³ Прочность на раздавливание $\sigma_p = 1.3\text{--}5.0$ МПа Пластическая прочность $p_m = 0.03\text{--}0.5$ МПа Взаимодействие с водой: набухание Модуль деформации: – упругой $E = 200\text{--}800$ МПа – общей $E_o = 1500\text{--}500$ МПа Вязкость ненарушенной структуры $10^{13}\text{--}10^{14}$ Па×с Сцепление $0.1\text{--}0.4$ МПа Угол внутреннего трения $18^\circ\text{--}32^\circ$
Фазовый ($p_i > 3 \times 10^{-7}$ Н)	Прочность на раздавливание $\sigma_p = 2\text{--}6$ МПа Взаимодействие с водой: набухание в ненарушенном сложении отсутствует; в нарушенном проявляют набухание Модуль деформации: – упругой $E = 300\text{--}1000$ МПа – общей $E_o = 250\text{--}800$ МПа Вязкость ненарушенной структуры $10^{14}\text{--}10^{16}$ Па×с Сцепление $0.12\text{--}0.8$ МПа Угол внутреннего трения $22^\circ\text{--}38^\circ$

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Классическая механика грунтов, как говорилось выше, исходит из того, что в основе прочности твердых тел лежит петрографический состав слагающих элементов и их упругие свойства. При этом установлено, что процесс деформирования под влиянием внешнего напряжения сопровождается изменением дисперсного состава грунтов в зоне разрушения. Такое представление механизма деформирования и разрушения можно считать приемлемым для массивных скальных грунтов, а также крупнообломочных и песчаных грунтов. Вместе с тем, оно не отвечает природе поведения глин. Это обусловлено двумя факторами. Во-первых, в глинах, в отличие от твердых массивных тел, действуют не только внешние силы, но и внутренние, обусловленные наличием

адсорбционных пленок вокруг частиц с их расклинивающим действием. Во-вторых, как было показано в работах М.М. Филатова [26], Е.М. Сергеева [22], В.Д. Ломтадзе [12], частицы глинистых минералов не разрушаются даже при высоких внешних напряжениях. Это позволяет считать, что механические свойства глинистых грунтов определяются не столько прочностью и упругостью самих слагающих элементов, сколько их взаимными структурными связями, реализуемыми через контакты.

С учетом сказанного, можно заключить, что теория эффективных напряжений К. Терцаги и теория предельного состояния грунтов Мора-Кулона неприменимы к глинистым грунтам для интерпретации их прочностных и деформационных свойств. Поэтому целью настоящих исследований является модификация этих теорий с позиции физико-химической механики.

Модификация теории К. Терцаги

Согласно теории К. Терцаги, прочность грунтов определяется из выражения

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

где ϕ — угол внутреннего трения, c — структурное сцепление, σ — общее внешнее напряжение, u — поровое давление. При этом предусматривается действие в грунтах только внешнего напряжения (σ).

Таким образом, теория К. Терцаги не учитывает физико-химические процессы на границе минерал-вода, приводящие к образованию на поверхности частиц тонкой пленки адсорбционной воды и появлению на контактах внутреннего расклинивающего давления. Это давление создает внутреннее напряжение, которое также, как и внешнее, передается на скелет грунта и влияет на его прочность. Поэтому напряженное состояние глинистых грунтов является функцией нескольких факторов:

- а) общего внешнего напряжения, прилагаемого к грунту;
- б) порового давления воды в порах грунта;
- в) расклинивающего давления (напряжения) гидратных пленок на контактах частиц.

Получаемую при учете всех трех факторов величину давления следует назвать *суммарным (истинным) эффективным напряжением*.

Исходя из этого, следует модифицировать теорию эффективных напряжений К. Терцаги применительно к глинистым грунтам. Для этого необходимо оценить истинное эффективное напряжение, которое определяется из следующего выражения [14]:

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

где σ'' — суммарное (истинное) эффективное давление, σ — внешнее давление, u' — активное поровое давление, σ_p — расклинивающее давление тонких пленок адсорбированной воды, определяемое по формуле:

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

где χ — число контактов в единице площади поверхности, на которых происходит перекрытие пленок связанной воды, $\Pi(h)$ — расклинивающее давление гидратной пленки, a_c — площадь коагуляционного контакта.

Тогда прочность дисперсных систем будет определяться из следующего выражения:

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

В формулу (5) входят два новых параметра, которые отсутствуют в формуле К. Терцаги. Первый — σ_p , характеризует внутреннее давление, возникающее в результате расклинивающего действия пленок. В наибольшей степени значение

этого параметра проявляется во влажных глинах с коагуляционными контактами, в которых они существенно влияют на внутреннее напряжение системы. При переходе к уплотненным и высоко литифицированным глинистым образованиям влияние гидратных пленок снижается и полностью исчезает.

Второй параметр — u' , характеризует активное поровое давление, возникающее в порах, занятых свободной водой. Для нахождения u' необходимо из общего объема пор вычесть объем пор, занимаемых адсорбированной водой.

Модификация формулы К. Терцаги позволяет использовать теорию реальных эффективных напряжений для оценки прочности, а также оценить ряд важнейших свойств грунтов, к числу которых относится способность тонких минеральных частиц находиться в устойчивом состоянии в водной среде. Поверхностные пленки осуществляют расклинивающее действие на контактах частиц и противостоят молекулярным силам притяжения, стремящимся вызвать коагуляцию и укрупнение структурных элементов. Другой специфической особенностью глин является их пластичность, также обусловленная наличием на контактах тонких пленок адсорбированной воды, обладающей вязким трением. При отсутствии таких пленок свободная вода легко отжимается из контактной зоны и не препятствует образованию “сухого” контакта между взаимодействующими частицами, т.е. исчезает эффект вязкого трения, а вместе с ним и пластичность всей системы. Выше уже упоминалось о такой специфической особенности глинистых образований, как давление набухания при увлажнении, являющееся непосредственным результатом расклинивающего действия гидратных пленок. Указанные процессы развиваются при взаимодействии минералов с водой даже при неизменности внешнего напряжения.

Таким образом, использование теории реальных эффективных напряжений с учетом как внешних, так и внутренних источников энергии, с применением физико-химической механики позволит повысить точность расчетов и расширить возможность оценки прочности и других свойств дисперсных систем.

Оценка предельной прочности глинистых грунтов с учетом наличия в них различных типов контактов

Предельная прочность глинистых грунтов и их состояние определяются суммарной прочностью контактов и ее соотношением с внешним напряжением. Общее уравнение прочности контактов выглядит следующим образом:

$$\sigma_n = \chi_1 \Pi(h)_1 a_{c1} + \chi_2 \Pi(h)_2 a_{c2} + \chi_3 \Pi(h)_3 a_{c3}, \quad (6)$$

где χ — количество контактов различных типов, $P(h)$ — их прочность, a_c — площадь единичного контакта на единицу поверхности; цифры в нижнем индексе 1, 2, 3 указывают на принадлежность контактов к коагуляционному, смешанному и фазовому типу соответственно.

Первое слагаемое уравнения (6) отражает прочность коагуляционных контактов, второе — прочность смешанных контактов, третье — прочность фазовых контактов. Устойчивость структур сохраняется, когда суммарная прочность контактов равна внешнему давлению. В случае, когда внутреннее расклинивающее давление больше внешнего, происходит набухание грунта, а при преобладании внешнего напряжения над внутренним идет доуплотнение грунта.

В зависимости от степени литификации и содержания различных типов контактов устойчивость глин и характер их прочностных свойств существенно изменяется. Это связано с изменением типа контактов и их относительного содержания в грунте. Преобладание коагуляционных контактов способствует образованию отрицательных расклинивающих сил на контактах, а формирование фазовых контактов приводит к преобладанию положительных сил притяжения.

Наименее прочными и сильно деформируемыми являются глинистые грунты с дальними коагуляционными структурами. Для таких структур характерна небольшая прочность, легкая разжижаемость, тиксотропное поведение при динамических воздействиях. Это, как правило, слабые грунты, теряющие свою устойчивость даже при очень небольших внешних напряжениях.

Структуры с ближними коагуляционными контактами имеют более высокую прочность, проявляют характерные особенности — пластичность, значительную деформируемость без разрыва сплошности.

Наиболее широкий диапазон устойчивости и разнообразия свойств имеют структуры со смешанным типом контактов. Количество коагуляционных участков у таких структур сокращается, в то же время у них появляются точечные участки с фазовыми контактами. Благодаря появлению прямых химических взаимодействий частиц на таких участках прочность структур со смешанным типом контактов становится значительно выше по сравнению с коагуляционными структурами, проявляется их упругое деформирование и полухрупкое разрушение.

При дальнейшем уплотнении и литификации в глинистых грунтах преобладающими становятся фазовые контакты, происходит их переход в глинистые сцементированные грунты (аргиллиты и алевролиты). Расклинивающее действие на контактах исчезает, происходит

преобразование грунтов с их упрочнением и уменьшением деформируемости.

Таким образом, на примере глинистых грунтов хорошо прослеживается как меняются их свойства и устойчивость при изменении контактных взаимодействий. Исходя из этого, при изучении глинистых грунтов следует отказаться от методов классической механики по оценке устойчивости дисперсных систем (теории предельного равновесия Мора-Кулона и теории эффективных напряжений К. Терцаги) и перейти на применение теории физико-химической механики.

Изложенное выше может быть взято за основу для разработки новых нормативных документов для проектирования и строительства сооружений на глинистых грунтах и предотвращения аварий на этих сложных природных образованиях. Основой для разработки таких документов могут служить представления физико-химической механики и статистический анализ экспериментальных определений показателей механических свойств глинистых грунтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют об отсутствии линейной зависимости между внешним напряжением и прочностью для дисперсных систем, к которым относятся глинистые грунты. Это объясняется тем, что теоретические расчеты устойчивости глинистых систем, их эффективных напряжений, вытекающие из теории предельного состояния Мора-Кулона и теории К. Терцаги, являются неверными и не отражают в должной мере физико-химические процессы, происходящие в глинах при их взаимодействии с водой.

2. Механизм деформирования в глинах отличается от других грунтов из-за формирования на поверхности глинистых частиц адсорбированной воды, обладающей расклинивающим действием. Это обуславливает появление на контактах, наряду с внешними, и внутренних напряжений.

3. При взаимном перекрытии на контактах пленок адсорбированной воды, в зависимости от степени литификации глин, происходит образование различных типов контактов между частицами: коагуляционных, смешанных и фазовых. Равновесие систем достигается, когда внешние напряжения компенсируются внутренними на контактах. Если внешние напряжения превосходят внутренние, то идет дополнительное уплотнение системы, а при $\sigma_p > \sigma$ происходит набухание глин.

4. Модернизация теории Мора-Кулона и К. Терцаги позволяет раскрыть истинный механизм поведения глинистых грунтов с учетом внешних и внутренних напряжений. Это открывает возможность для разработки методов

прогнозирования поведения глинистых систем в зависимости от характера изменения контактных взаимодействий и связанных с ними свойств, исходя из физико-химической механики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вода в дисперсных системах / Под ред. Б.В. Дерягина, Н.В. Чураева, Ф.Д. Овчаренко и др. М.: Химия, 1989. 288 с.
2. *Дерягин Б.В.* Теория устойчивости коллоидов и тонких плёнок. М.: Наука, 1986. 205 с.
3. *Дерягин Б.В., Кусаков М.М.* Свойства тонких слоев жидкости // Изв. АН СССР, сер. хим., 1936. № 5. С. 741–753.
4. *Дерягин Б.В., Обухов Е.В.* Аномальные свойства тонких слоев жидкости. Ультрамикроскопические исследования лиосфер (сольватных оболочек) и элементарного акта набухания // Коллоидный журнал. 1935. Т. 1. Вып. 5. С. 385–398.
5. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В.* Изотерма расклинивающего давления пленок воды на поверхности кварца // Докл. АН СССР. 1972. Т. 207. № 3. С. 572–575.
6. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В.* Смачивающие пленки. М.: Наука, 1984. 137 с.
7. *Зорин З.М., Соболев В.Д., Чураев Н.В.* Изменение капиллярного давления поверхностного натяжения и вязкости жидкости в кварцевых микрокапиллярах // Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах. М.: Наука, 1972. С. 214–221.
8. *Карпенко Ф.С.* Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // Геоэкология. 2019. № 5. С. 48–60.
9. *Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Кальбергенов Р.Г.* Влияние расклинивающего действия гидратных пленок на прочностные свойства глинистых грунтов // Геоэкология. 2018. № 4. С. 68–74.
10. *Квилдизе В.И., Краснушкин А.В., Злочевская Р.И.* Свойства поверхностных пленок и слоев воды // Поверхностные пленки воды в дисперсных структурах. М.: Изд-во МГУ, 1988. С. 48–67.
11. *Краснушкин А.В., Квилдизе В.И., Ядынина И.В.* К вопросу о растворяющей способности связанной воды // Связанная вода в дисперсных системах. М.: Изд-во МГУ, 1980. № 5. С. 99–104.
12. *Ломтадзе В.Д.* Изменение состава, структуры, плотности и связности глин при уплотнении их большими нагрузками // Тр. Лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР. 1955. Т. 12.
13. *Осипов В.И.* Нанопленки адсорбированной воды в глинах, механизм их образования и свойства // Геоэкология. 2011. № 4. С. 291–305.
14. *Осипов В.И.* Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИФЗ РАН, 2012. 72 с.
15. *Осипов В.И., Карпенко Ф.С., Румянцева Н.А.* Активная пористость и ее влияние на физико-химические свойства глинистых грунтов // Геоэкология. 2014. № 3. С. 262–269.
16. *Осипов В.И., Соколов В.Н.* Глины и их свойства. М.: ГЕОС, 2013. 575 с.
17. *Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А.* Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1979. 211 с.
18. Поверхностные пленки воды в дисперсных структурах / Под ред. Е.Д. Шукина. М.: МГУ, 1988. 279 с.
19. *Рибиндер П.А.* Физико-химическая механика. М.: Знание, 1958. 64 с.
20. *Рибиндер П.А.* Физико-химическая механика дисперсных структур // Сб. статей “Физико-химическая механика дисперсных структур”. М.: Наука, 1966. С. 3–16.
21. Связанная вода в дисперсных системах. М.: МГУ, Вып. 4. 1977.
22. *Сергеев Е.М.* К вопросу о механической прочности дисперсных грунтов // Учен. зап. МГУ. 1949. № 10.
23. *Соколов В.Н.* Физико-химические аспекты механического поведения глинистых грунтов // Инженерная геология. 1985. № 4. С. 28–41.
24. *Соколов В.Н.* Модели микроструктур глинистых грунтов // Инженерная геология. 1991. № 6. С. 32–40.
25. *Соколов В.Н., Осипов В.И.* Влияние различных категорий связанной воды на прочность глин // Связанная вода в дисперсных системах. М.: МГУ, 1977. Вып. 4. С. 4–15.
26. *Филатов М.М.* Основы дорожного строительства. М-Л.: Госстройиздат. 1936. 538 с.
27. Физико-химическая механика природных дисперсных систем / Под ред. Е.Д. Шукина, Н.В. Перцева, В.И. Осипова, Р.И. Злочевской. М.: МГУ, 1985. 263 с.
28. *Шукин Е.Д., Перцев А.В., Амелина Е.А.* Коллоидная химия. М.: МГУ, 1982. 352
29. *Яминский В.В., Пчелин В.А., Амелина Е.А., Шукин Е.Д.* Коагуляционные контакты в дисперсных системах. М.: Химия, 1982. 185 с.
30. *Fukue M., Minato T., Taya N., Chida T.* Thickness of adsorbed water layers for clay particles. Clay science for Engineering, Adachi&Fukue (eds), 2001, Balkama. Rotterdam. ISBN905809175g.
31. *Ravina J., Low P.F.* Relation between swelling, water properties and b-dimension in montmorillonite – water systems // Clays and clay minerals. 1972. V. 20. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1972.0200302>
32. *Read A.D., Kitchiner J.A.* Wetting films of silica // J. Colloid and Interface Sci. 1969. V. 30. № 3. P. 391–398.

PHYSICOCHEMICAL MECHANICS OF DISPERSE POROUS MATERIALS AS A NEW APPROACH TO ASSESSING MECHANICAL STABILITY OF CLAY SOILS

V. I. Osipov^{a,#}, V. N. Sokolov^{b,##}, F. S. Karpenko^{a,###}

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

^b*Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*

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

^{##}*E-mail: sokolov@geol.msu.ru*

^{###}*E-mail: kafs08@bk.ru*

Data are presented on the discrepancy between theoretical calculations and experimental results on assessing the strength of fine dispersed bodies including clay soils. Physicochemical processes operating on the surface of dispersed particles are considered upon interaction of latter with water and the formation of adsorbed water films producing disjoining pressure. The presence of films exerting the disjoining effect controls the development of various types of contacts between soil particles in the course of lithogenesis, i.e., coagulation, transitional, and phase contacts. These contacts are the most important factors influencing the behavior of clay soils. The study dwells on the effect of contact types on the state, deformability and stability of clay soils under external impact. It is concluded that the assessment of clay behavior should be based on physicochemical mechanics, patterns of contact interactions in fine-grained soils, and statistical analysis of experimentally obtained parameters of the mechanical properties of clays.

Keywords: *adsorbed water, structured and diffuse water films, disjoining pressure, disjoining pressure isotherm, coagulation, mixed and phase types of contacts, external and internal stresses*

REFERENCES

- [Water in dispersed systems]. Deryagin, B.V., Churaev, N.V., Ovcharenko, N.V. et al., Eds. Moscow, Khimiya Publ., 1989, 288 p. (in Russian)
- Deryagin, B.V. [Theory of stability of colloids and thin films]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 205 p. (in Russian)
- Deryagin, B.V., Kusakov, M.M. [Properties of thin liquid layers]. *Izv. AN SSSR, ser. khim.*, 1936, no. 5, pp. 741–753. (in Russian)
- Deryagin, B.V., Obukhov, E.V. [Anomalous properties of thin layers of liquid. Ultramicroscopic studies of lyospheres (solvation envelopes) and the elementary act of swelling]. *Kolloidnyi zhurnal*, 1935, vol. 1, issue 5, pp. 385–398. (in Russian)
- Deryagin, B.V., Churaev, N.V. [Disjoining pressure isotherm of water films on the quartz surface]. *Dokl. AN SSSR*, 1972, vol. 207, no. 3, pp. 572–575. (in Russian)
- Deryagin, B.V., Churaev, N.V. [Wetting films]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 137 p. (in Russian)
- Zorin, Z.M., Sobolev, V.D., Churaev, N.V. [Changes in capillary pressure, surface tension and liquid viscosity in quartz microcapillaries]. In: [Surface forces in thin films and dispersed systems]. Moscow, Nauka Publ., 1972, pp. 214–221. (in Russian)
- Karpenko, F.S. [Physicochemical nature of the clay soil strength]. *Geokologiya*, 2019, no. 5, pp. 48–60. (in Russian)
- Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G. [Disjoining effect of hydrate films on the strength properties of clay soils]. *Geokologiya*, 2018, no. 4, pp. 68–74. (in Russian)
- Kvilidze, V.I., Krasnushkin, A.V., Zlochevskaya, R.I. [Properties of surface films and layers of water]. In: [Surface films of water in dispersed structures]. Moscow, MGU Publ., 1988, pp. 48–67. (in Russian)
- Krasnushkin, A.V., Kvilidze, V.I., Yadygina, I.V. [On the issue of bound water dissolvability]. In: [Bound water in dispersed systems]. Moscow, MGU Publ., 1980, no. 5, pp. 99–104. (in Russian)
- Lomtadze, V.D. [Changes in the composition, structure, density and cohesion of clays during their compaction with heavy loads]. In: [Proc. Laboratory for Hydrogeological Problems, the USSR Academy of Sciences]. 1955, vol. 12. (in Russian)
- Osipov, V.I. [Nanofilms of adsorbed water in clays, mechanism of their formation and properties]. *Geokologiya*, 2011, no. 4, pp. 291–305. (in Russian)
- Osipov, V.I. [Physicochemical theory of effective stresses in soils]. Moscow, IFZ RAN Publ., 2012, 72 p. (in Russian)
- Osipov, V.I., Karpenko, F.S., Rummyantseva, N.A. [Active porosity and its influence on the physicochemical properties of clay soils]. *Geokologiya*, 2014, no. 3, pp. 262–269. (in Russian)
- Osipov, V.I., Sokolov, V.N. [Clays and their properties]. Moscow, GEOS Publ., 2013, 575 p. (in Russian)
- Osipov, V.I., Sokolov, V.N., Rummyantseva, N.A. [Microstructure of clay soils]. Moscow, Nedra Publ., 1979, 211 p. (in Russian)
- [Surface films of water in dispersed structures]. Shchukin, E.D., Ed., Moscow, MGU Publ., 1988, 279 p. (in Russian)
- Rebinder, P.A. [Physicochemical mechanics]. Moscow, Znaniye Publ., 1958, 64 p. (in Russian)
- Rebinder, P.A. [Physicochemical mechanics of dispersed structures]. In: [Collection of articles "Physicochemical mechanics of dispersed structures"]. Moscow, Nauka Publ., 1966, pp. 3–16. (in Russian)
- [Bound water in dispersed systems]. Moscow, MGU Publ., 1977, vol. 4. (in Russian)
- Sergeev, E.M. [On the issue of mechanical strength of dispersed soils]. *Uchenye zapiski MGU*, 1949, no. 10. (in Russian)

23. Sokolov, V.N. [Physicochemical aspects of mechanical behavior of clay soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 1985, no. 4, pp. 28–41. (in Russian)
24. Sokolov, V.N. [Models of microstructures of clay soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 1991, no. 6, pp. 32–40. (in Russian)
25. Sokolov, V.N., Osipov, V.I. [The influence of various categories of bound water on the strength of clays]. In: [Bound water in dispersed systems]. Moscow, MGU Publ., 1977, issue 4, pp. 4–15. (in Russian)
26. Filatov, M.M. [Fundamentals of road construction]. Moscow-Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1936, 538 p. (in Russian)
27. [Physicochemical mechanics of natural dispersed systems]. Shchukin, E.D., Pertsev N.V., Osipov, V.I., Zlochevskaya, R.I., Eds. Moscow, MGU Publ., 1985, 263 p. (in Russian)
28. Shchukin, E.D., Pertsev, A.V., Amelina, E.A. [Colloidal chemistry]. Moscow, MGU Publ., 1982, 352 p. (in Russian)
29. Yaminskii, V.V., Pchelin, V.A., Amelina, E.A., Shchukin, E.D. [Coagulation contacts in dispersed systems]. Moscow, Khimiya Publ., 1982, 185 p. (in Russian)
30. Fukue, M., Minato, T., Taya, N., Chida, T. Thickness of adsorbed water layers for clay particles. Clay science for Engineering, Adachi, Fukue, Eds., 2001, Rotterdam, Balkama Publ.
31. Ravina, J., Low, P.F. Relation between swelling, water properties and b-dimension in montmorillonite – water systems. *Clays and clay minerals*, 1972, vol. 20. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1972.0200302>
32. Read, A.D., Kitchiner, J.A. Wetting films of silica. *J. Colloid and Interface Sci.*, 1969, vol. 30, no. 3, pp. 391–398.