

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.33>

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРОГНОЗА ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ  
ДИСПЕРСНЫХ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

Научная статья

Хансиварова Н.М.<sup>1,\*</sup>, Денисенко А.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-4494-7493;

<sup>1,2</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (n.khansivarova[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Представлена теоретическая модель свойств дисперсных связных грунтов. Показано, что их отличительной особенностью является активное взаимодействие минеральной и жидкой компонентами. Оно реализуется на межфазных границах через образование двойного электрического слоя (ДЭС) и гидратации. Присутствие глинистых минералов оказывает существенное влияние на ее этапы, в ходе которых происходит образование различных категорий воды жидкой компоненты. Наибольший интерес представляет вода осмотического типа. Она находится в виде равновесных диффузных слоев ДЭС, а их толщина определяет силу расклинивающего действия, препятствующую возникновению прочных контактов. Их тип и количество оказывает влияние практически на все свойства грунтов. Изложенные теоретические положения должны быть учтены при постановке задачи, направленной на поиск корреляционных зависимостей между показателями свойств дисперсных связных грунтов с целью дальнейшего прогноза их поведения как оснований зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** дисперсные грунты, минеральная и жидкая компоненты, глинистые минералы.

THEORETICAL ASPECTS OF PROBLEM SETTING FOR PREDICTING CHANGES IN THE PROPERTIES OF  
DISPERSED COHESIVE SOILS

Research article

Khansivarova N.M.<sup>1,\*</sup>, Denisenko A.M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-4494-7493;

<sup>1,2</sup> Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

\* Corresponding author (n.khansivarova[at]yandex.ru)

**Abstract**

A theoretical model of properties of dispersed cohesive soils is presented. It is shown that their distinctive feature is active interaction of mineral and liquid components. It is implemented at interfacial boundaries through the formation of a double electric layer (DEL) and hydration. The presence of clay minerals has a significant influence on its stages, during which different categories of water of the liquid component are formed. Water of osmotic type is of greatest interest. It is found in the form of equilibrium diffuse layers of DEL, and their thickness determines the force of propping action, preventing the formation of strong contacts. Their type and quantity influence practically all properties of soils. The stated theoretical provisions should be taken into account when setting the task aimed at searching for correlation dependencies between the property indicators of dispersed cohesive soils in order to further predict their behaviour as bases for buildings and structures.

**Keywords:** dispersed soils, mineral and liquid components, clay minerals.

**Введение**

В инженерной геологии грунт рассматривается, как сложная, динамическая, открытая, дискретная система, состоящая из четырех компонентов: твердой (минеральной), жидкой, газовой и биоты [1]. При решении производственных инженерно-геологических задач, как правило, исследуются твердая и жидкая компоненты, а газовая и биотическая, в силу малой изученности, исключаются.

Объектом запланированных исследований являются специфические просадочные дисперсные связные грунты предкавказской части Скифской плиты Русской платформы и Азово-Кубанского краевого прогиба [2]. Одной из поставленных задач, обозначен поиск корреляционно значимых и функциональных связей между свойствами грунтов с целью прогноза их изменений при строительном освоении территорий. Успешное решение данной задачи обеспечит сокращение финансовых затрат на лабораторные испытания грунтов; получение надежной информации об особенностях состава, состояния и свойств грунтов конкретного региона и, как следствие, повышение достоверности и качества результатов инженерно-геологических изысканий.

Цель настоящего сообщения – представить модель формирования свойств дисперсного связного грунта, проявляющего просадочные свойства, которая подразумевает выявление существующих причинно-следственных связей между основными процессами, протекающими в грунтовых дисперсных системах и участвующих в формировании их свойств [3]. Теоретический анализ необходим для дальнейшего поиска зависимостей между отдельными показателями свойств, значимых для построения прогнозных моделей дисперсных связных грунтов Европейской части юга России.

Основные методы исследования:

- Историко-генетический метод [4].
- Аналитический метод, а именно, анализ теоретических положений грунтоведения, физической и коллоидной химии, механики грунтов: теория связанной воды [5]; теория структурообразования и контактных взаимодействий [6], [7]; теория ДЛФО [8]; теория ДЭС [9].

### Результаты исследования и их обсуждение

Для корректной постановки задачи исследований, необходимо иметь представление о локации основных компонент грунта в некотором объеме, характере взаимодействия этих компонент и их участия в формировании свойств грунта. Ниже приведено краткое описание основных компонент и их параметры.

Плотность грунта ( $\rho$ ) при природной влажности – одно из основных свойств, определяется лабораторными методами и количественно оценивается отношением массы к занимаемому объему [10]. По сути, показывает соотношение твердой и жидкой составляющих в единице объема. Плотность влажного грунта складывается из плотности частиц минералов, горных пород, органических включений твердой фазы, а также различных категорий присутствующей воды. В дисперсных грунтах ее виды и количество зависят от минералогического состава твердой компоненты. Ее неотъемлемой частью являются глинистые минералы, которые взаимодействуют с водой через активные адсорбционные центры: катионы-компенсаторы структурного заряда; гидроксильные группы и атомы кислорода базальных поверхностей; валентно ненасыщенные атомы боковых сколов [9]. Известно, что глинистые минералы имеют первостепенное значение в гидратации, на различных этапах которой, образуются определенные категории и разновидности воды, от прочносвязанной и слабосвязанной (осмотической, капиллярной) до свободной иммобилизованной [5], [11]. Осмотическая вода, как правило, находится в виде оболочек, окружающих частицы и их агрегаты.

Наряду с плотностью грунта при природной влажности, свойства минеральной компоненты оцениваются плотностью скелета грунта ( $\rho_d$ ) и плотностью твердых частиц ( $\rho_s$ ). Первый показатель принимается по расчетным формулам, второй – может определяться как расчетом, так и прямым пикнометрическим лабораторным методом. Оба параметра количественно выражаются отношением плотности твердых частиц либо к занимаемому ими объему ( $\rho_s$ ), либо ко всему объему грунта, за исключением жидкой фазы ( $\rho_s$ ) [10]. Следовательно, плотность твердых частиц ( $\rho_s$ ) характеризует только минеральный компонент. Показатель плотности скелета грунта ( $\rho_d$ ), кроме твердой фазы связан с пустотным пространством грунта, которое обусловлено его дискретностью и проявляется наличием пор и трещин различной формы и размеров. Пустотность дисперсных грунтов выражается двумя показателями: пористостью ( $n$ ) и коэффициентом пористости ( $e$ ) [10]. Пористость представляет собой отношение объема пустот (пор) ко всему объему грунта и, следовательно, связана с плотностью, поскольку при расчете учитывается полный объем грунта. Коэффициент пористости – отношение объема пустот (пор) к объему твердых частиц т.е. в большей степени связан с твердой фазой грунта [10]. Пористость – важное свойство, определяющее поведение грунта под действием механических нагрузок. Наличие пор позволяет частицам твердой фазы занимать более компактное положение, обеспечивающее уплотнение грунта за счет сокращения порового пространства. Таким образом, пористость может рассматриваться, как некий резервный объем, который дает возможность грунту сжиматься при передаче на него внешнего давления т.е. проявлять деформационные свойства.

Следует отметить, что на сегодняшний день отсутствуют прямые методы измерения пористости. Исключение составляет метод вытеснения, который используется при исследовании коллекторских свойств нефтяных пластов, однако, в грунтоведении он не нашел применения. Совершенно очевидно, что поиск взаимосвязи пористости с другими свойствами, прямое определение которых не вызывает затруднения, является важной задачей. Ее решение обеспечит более высокую достоверность количественной оценки пустотности и, как следствие, других показателей, связанных с ней.

При различных условиях поровое пространство имеет неодинаковую степень заполнения водой и это формирует консистенцию грунта – состояния, характеризующего способность сохранять форму без или при наличии внешнего механического воздействия [11]. Влажность может повышаться до полного водонасыщения, при котором весь объем пор заполнен водой. Степень заполнения пор оценивается коэффициентом водонасыщения ( $S_r$ ). Его величина численно равна отношению объема воды или жидкости к объему пор грунта и определяется расчетом [11].

Для оценки состояния (консистенции) используется показатель текучести  $I_L$ . В зависимости от количества жидкой фазы, консистенция может изменяться от твердой до текучей [12]. Способность дисперсных грунтов находится в различных консистентных состояниях связана с пластичностью – свойством грунта изменять форму под действием внешней нагрузки без разрушения структуры. Пластичность оценивается следующими показателями: влажностью на границе раскатывания (нижний предел пластичности,  $W_p$ ), влажностью на границе текучести (верхний предел пластичности,  $W_L$ ) и разницей между ними – числом пластичности ( $I_p$ ) [10]. Таким образом, пластичность проявляется в определенном диапазоне влажности. Смысловое значение пределов пластичности заключается в постепенном формировании и преобладании различных категорий и видов воды в грунте. Нижний предел характеризует начальную стадию образования слабосвязанной, а именно, осмотической воды, минимальное количество которой дает возможность частицам твердой фазы свободно перемещаться друг относительно друга. В этом случае вода играет роль смазки. При дальнейшем увлажнении, происходит максимальное раскрытие водных оболочек с последующим образованием свободной иммобилизованной воды. Достижение верхнего предела пластичности свидетельствует о максимальном содержании всех видов воды, при котором грунт еще находится в пластичном состоянии. Превышение данного предела приводит к переходу грунта в текучее состояние, что свидетельствует о разрушении структурных связей между частицами твердой фазы.

Отдельной группой обособлены свойства грунтов сопротивляться напряжениям, возникающим в грунтовом массиве при передаче на него давления от зданий и сооружений. Так, способность грунта сопротивляться разрушению под влиянием нагрузок выше критических, формирует прочностные свойства, которые определяются силой

структурных связей на контактах частиц, типом контактов и их количеством. Наличие в дисперсных связных грунтах слабосвязанной воды оказывает существенное влияние на их прочность. Расклинивающее действие водных оболочек препятствует сближению частиц и, как следствие, трансформации преобладающих в дисперсных грунтах контактов переходного типа в более прочные фазовые контакты. Вместо них, согласно теории контактных взаимодействий, формируются неустойчивые контакты коагуляционного типа [6], [7]. Кроме того, в дисперсных грунтах наиболее распространены связи механической и физической природы (ионные, электростатические, ионно-электростатические и др.). Это лабильные, довольно слабые связи, которые легко разрушаются при взаимодействии с водой [6], [7]. Таким образом, прочность дисперсных связных грунтов в значительной степени зависит от количества категорий воды жидкой фазы. Одним из параметров прочностных свойств является сцепление ( $C$ ) – величина, характеризующая природу и надежность структурных связей между частицами твердой компоненты. Другим показателем прочности служит угол внутреннего трения, который определяется при лабораторных испытаниях грунта на сдвиг [11]. Условия опыта подразумевают, что разрушение грунта происходит под действием нормального сжимающего  $\delta$  и касательного сдвигающего  $\tau$  напряжений т.е. при их определенном соотношении, которое описывается законом Кулона. Таким образом, невозможно разграничить силы сцепления и величину трения в процессе сдвига и результаты лабораторных испытаний на прочность, не дают полного представления о механизме сопротивления сдвигающей нагрузке, а показатели прочности  $C$  и  $\varphi$  являются косвенными. Все это демонстрирует важность поиска, либо прямых методов измерения прочности структурных связей, либо выявления корреляционных зависимостей прочностных показателей с другими свойствами, определение которых является доступным и достоверным.

Под действием нагрузок, не приводящих к разрушению грунта, проявляются деформационные свойства, такие как сжимаемость и просадочность. Они оцениваются величинами модуля деформации ( $E$ ) и относительной деформацией просадочности ( $\epsilon_{si}$ ). Модуль деформации представляет собой коэффициент пропорциональности между напряжениями и деформациями, возникающими в грунте [11]. Определяется в ходе компрессионных испытаний в интервале заданных нагрузок. Просадочность – способность грунта доуплотняться при повышении влажности под действием собственного веса или дополнительной нагрузки [13]. Устанавливается лабораторными методами по схемам «одной кривых» или «двух кривых». В испытаниях участвуют образцы грунтов природной влажности и полностью водонасыщенные. Как было показано выше, проявление деформационных свойств возможно при наличии достаточно обширного пустотного пространства. Под воздействием внешней нагрузки на грунт, его деформация обусловлена сокращением объема пор, кроме того, имеет значение степень их заполнения жидкой фазой. При увеличении нагрузки из пор отжимается свободная вода и какое-то количество осмотической воды, обеспечивая дальнейшей деформацию за счет освобожденных пустот. Последующая деформация грунта будет определяться количеством связанной воды вокруг частиц и на их контактах. Чем тоньше гидратная оболочка, тем меньше ее расклинивающее действие, а, следовательно, тем больше сжимаемость грунта [8], [9]. Таким образом, прочностные и деформационные свойства грунта зависят от характера взаимодействия между твердой и жидкой компонентами.

В грунтоведении существует понятие вещественного состава, одним из параметров которого служат размеры частиц твердой фазы – фракции. Известно, что глинистые минералы обладают высокой удельной поверхностью, обусловленной малыми размерами частиц. В гранулометрическом составе грунтов глинистые частицы формируют тонкодисперсные фракции – пылеватую ( $< 0,005$  мм) и глинистую ( $< 0,002$  мм) [14]. Данные фракции преобладают в дисперсных связных грунтах, а количественное определение пылеватой фракции является обязательным при выполнении инженерно-геологических изысканий. В связи с тем, что данная фракция представлена частицами, сформированными глинистыми минералами, то ее содержание может рассматриваться как косвенный показатель минералогического состава твердой фазы. Связь пылеватой фракции и смешаннослойных минералов подтверждена некоторыми исследованиями [14]. Кроме того, этими же авторами установлено, что число пластичности, также, можно рассматривать в качестве косвенного показателя минералогического состава, поскольку количество связанной воды в грунте в первом приближении пропорционально ее удельной поверхности.

Все вышеизложенное показывает, что в грунтовых дисперсных системах, взаимодействие между твердой и жидкой компонентами осуществляется, в основном, через образование связанной воды в процессе гидратации.

Другим проявлением связи компонент грунта является образование двойного электрического слоя (ДЭС). В грунтоведении он рассматривается как механизм компенсации отрицательного заряда, возникающего на поверхности частиц вследствие изоморфных гетеровалентных замещений в кристаллических решетках глинистых минералов [9]. Наличием ДЭС на границе «минерал – вода» обусловлены физико-химические свойства дисперсных грунтов, такие как, адсорбционные, ионно-обменные, коррозионные и др. Изучение взаимосвязи данных свойств не входит в задачи настоящего исследования и поэтому они не рассматриваются.

### Заключение

1. Дисперсные грунты представляют собой сложные, открытые, динамичные, дискретные системы. Важной особенностью, отличающей их от грунтов других классов, является активное взаимодействие между их основными компонентами – минеральной и жидкой. Характер, интенсивность, направленность этих взаимодействий определяют и изменяют состав, состояние и свойства дисперсных связных грунтов.

2. В структуре твердой компоненты существенное значение имеют глинистые минералы – слоистые силикаты, кристаллохимическое строение и высокая дисперсность которых, обуславливают активное взаимодействие с жидкой фазой. Оно реализуется через электроповерхностные явления, протекающие на границе «минерал – вода», такие как, адсорбция, образование двойного электрического слоя (ДЭС), гидратация. Гидратацию можно рассматривать как ведущий механизм образования всех категорий воды в грунтах, определяющей количество жидкой фазы и влажностные параметры дисперсных связных грунтов.

3. В составе жидкой компоненты весомое влияние на свойства пород оказывает слабосвязанная осмотическая вода. В грунтах она пребывает в виде равновесных оболочек диффузного слоя ДЭС, толщина которых контролирует, как

особенности взаимодействия структурных элементов твердой фазы между собой, так и особенности их взаимодействия с жидкой фазой, представленной различными категориями воды.

4. Установлено, что количество осмотической воды в грунтах связано с содержанием глинистой фракции. Таким образом, первоочередной задачей предстоящих исследований должен стать поиск корреляционных зависимостей между содержанием пылеватой фракции и другими показателями свойств грунтов. В список приоритетных переменных необходимо включить характеристики влажности грунта и их производные. Вторым перспективным направлением исследований, следует обозначить пластичные свойства грунта и их показатели, поскольку они фиксируют минимальное и максимальное содержание осмотической влаги в грунтах. В обоих направлениях предпочтение должно отдаваться свойствам, которые определяются прямыми лабораторными методами.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Трофимов В.Т. Теоретические аспекты грунтоведения / В.Т. Трофимов. — М.: Изд-во МГУ, 2003. — 114 с.
2. Черкасов М.И. Инженерно-геологическое районирование Северного Кавказа / М.И. Черкасов. — Изд-во Ростовского университета, 1985. — 157 с.
3. Теоретические основы аспекты инженерной геологии / Под редакцией Трофимова В.Т. — М.: Издательство «Академическая наука» ООО «Гео-маркетинг», 2019. — 280 с.
4. Трофимов В. Т. О фундаментальных аспектах генетического подхода к изучению грунтов / В.Т. Трофимов, В. А. Королёв // Инженерная геология. — 2019. — Т. 14, № 1. — С. 8–19.
5. Вода в дисперсных системах / Под ред. Б.В. Дерягина и др. — М.: Химия, 1989. — 288 с.
6. Физико-химическая механика природных дисперсных систем / Под ред. Е.Д. Шукина и др. — М.: Изд-во МГУ, 1985. — 266 с.
7. Осипов В.И. Микроструктура глинистых пород / В.И. Осипов, В.Н. Соколов, Н.А. Румянцева ; Под ред. Е.М. Сергеева. — М.: Недра, 1989. — 211 с.
8. Дерягин Б.В. Поверхностные силы / Б.В. Дерягин, М.В. Чураев, В.М. Муллер. — М.: Наука, 1985. — С. 3. — 398 с.
9. Злочевская Р.И. Электроповерхностные явления в глинистых породах / Р.И. Злочевская, В.А. Королев. — М.: Изд-во МГУ, 1988. — 177 с.
10. ГОСТ 5180—2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — М.: Стандартинформ, 2015. — 23 с.
11. Трофимов В.Т. Грунтоведение / В.Т. Трофимов, В.А. Королев, Е.А. Вознесенский [и др.] Под ред. В.Т. Трофимова. — 6-е изд., переработ. и доп. — М.: Изд-во МГУ, 2005. — 1024 с.
12. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. — М.: Стандартинформ, 2020. — 41 с.
13. ГОСТ 12536—2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. — М.: Стандартинформ, 2014. — 20 с.
14. Ананьев В.П. Минералы лессовых пород / В.П. Ананьев, В.И. Коробкин. — Ростов-н/Дону: Изд-во Ростовского университета, 1980. — 200 с.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Trofimov V.T. Teoreticheskie aspekty gruntovedeniya [Theoretical Aspects of Soil Science] / V.T. Trofimov. — M.: Publishing House of MSU, 2003. — 114 p. [in Russian]
2. Cherkasov M.I. Inzhenerno-geologicheskoe rajonirovanie Severnogo Kavkaza [Engineering and Geological Zoning of the North Caucasus] / M.I. Cherkasov. — Publishing House of Rostov University, 1985. — 157 p. [in Russian]
3. Teoreticheskie osnovy aspekty inzhenernoj geologii [Theoretical Foundations of Aspects of Engineering Geology] / Edited by Trofimov V.T. — M.: Publishing House «Academic Science» LLC «Geo-marketing», 2019. — 280 p. [in Russian]
4. Trofimov V. T. O fundamental'nyh aspektah geneticheskogo podhoda k izucheniju gruntov [On Fundamental Aspects of the Genetic Approach to the Study of Soils] / V.T. Trofimov, V. A. Koroljov // Inzhenernaja geologija [Engineering Geology]. — 2019. — Vol. 14, № 1. — P. 8–19. [in Russian]
5. Voda v dispersnyh sistemah [Water in Dispersed Systems] / ed. by B.V. Derjagin et al. — M.: Himija, 1989. — 288 p. [in Russian]
6. Fiziko-himicheskaja mehanika prirodnyh dispersnyh sistem [Physico-chemical Mechanics of Natural Dispersed Systems] / Ed. by E.D. Shhukin et al. — M.: Publishing House of MSU, 1985. — 266 p. [in Russian]
7. Osipov V.I. Mikrostruktura glinistykh porod [Microstructure of Clay Rocks] / V.I. Osipov, V.N. Sokolov, N.A. Rumjanceva ; Ed. by E.M. Sergeev. — M.: Nedra, 1989. — 211 p. [in Russian]
8. Derjagin B.V. Poverhnostnye sily [Surface Forces] / B.V. Derjagin, M.V. Churaev, V.M. Muller. — M.: Nauka, 1985. — P. 3. — 398 p. [in Russian]

9. Zlochevskaja R.I. Jelektropoverhnostnye javlenija v glinistyh porodah [Electrosurface Phenomena in Clayey Rocks] / R.I. Zlochevskaja, V.A. Korolev. — M.: Publishing House of MSU, 1988. — 177 p. [in Russian]
10. GOST 5180—2015. Grunty. Metody laboratornogo opredelenija fiziceskih harakteristik [GOST 5180-2015. Soils. Methods of Laboratory Determination of Physical Characteristics]. — M.: Standartinform, 2015. — 23 p. [in Russian]
11. Trofimov V.T. Gruntovedenie / V.T. Trofimov, V.A. Korolev, E.A. Voznesenskij [et al.] Ed. by V.T. Trofimov. — 6-th ed., rev. and suppl. — M.: Publishing House of MSU, 2005. — 1024 p. [in Russian]
12. GOST 25100-2020. Grunty. Klassifikacija [GOST 25100-2020. Soils. Classification]. — M.: Standartinform, 2020. — 41 p. [in Russian]
13. GOST 12536—2014. Grunty. Metody laboratornogo opredelenija granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava [GOST 12536-2014. Soils. Methods for Laboratory Determination of Granulometric (Grain) and Microaggregate Composition]. — M.: Standartinform, 2014. — 20 p. [in Russian]
14. Anan'ev V.P. Mineraly lessovyh porod [Woodland Minerals] / V.P. Anan'ev, V.I. Korobkin. — Rostov-on-Don: Publishing House of Rostov University, 1980. — 200 p. [in Russian]