

ЕСТЕСТВЕННАЯ ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ. ЧАСТЬ 1



Продолжаем серию публикаций в рамках подготовки конференции журнала «ГеоИнфо» и комитета по инженерным изысканиям НОПРИЗ «Грунтовая лаборатория – 2018».

В настоящей статье на основе работ В.В. Охотина, П.О. Бойченко, И.П. Иванова, В.И. Осипова рассматриваются вопросы прочности и деформируемости глинистых грунтов в свете контактных взаимодействий. Анализируется свойство грунта первого порядка – консистенция грунта естественного сложения C_v . На основе понятий «критическая точка состояния грунта» впервые предлагается теория естественной прочности грунта на основе контактных взаимодействий (ЕПКВ). Предлагается экспресс-метод определения прочностных и деформационных свойств глинистых грунтов методом пенетрации: «одним усилием – конусом постоянной массы». Базируясь на многолетних лабораторных определениях физико-механических свойств грунтов методом пенетрации получены зависимости величины консистенции грунта естественного сложения, показателя текучести с величинами сцепления, углами внутреннего трения, сопротивления недренированному сдвигу и деформации. Предлагается разделение консистенции

грунта на 10 категорий. Приводятся таблицы и номограммы для определения показателей свойств грунтов в зависимости от C_v .

Здобин Дмитрий Юрьевич

Преподаватель Санкт-Петербургского государственного университета, ученый секретарь Охотинского общества грунтоведов, д.г.-м.н.

zdobin_soil@mail.ru

Шелестят паруса кораблей...
Н. Гумилев

Введение

В настоящее время в теоретическом грунтоведении на основе физико-химической механики дисперсных систем достигнуты определенные (если не сказать революционные) результаты, отражающие взаимосвязь между типом контактов между частицами, типом микростроения природной дисперсной системы (грунта) и физико-химическими и механическими свойствами. Причем если взаимосвязь между физико-химическими свойствами грунта и типом контактов между его частицами очевидна, то взаимосвязь между его механическими (прочностными и деформационными) характеристиками и типом контактов только начинает осмысливаться и системно разрабатываться.

Теоретической основой для данной работы послужили труды К. Терцаги [22] по механике грунтов, П.А. Ребиндера [18] и Б.В. Дерягина [7] по физической и коллоидной химии, работы по грунтоведению В.В. Охотина [16] (предложил рассматривать грунт как многофазную дисперсную систему), В.Н. Соколова [20, 21] (выделил типы микроструктур грунта), П.О. Бойченко [1] (ввел понятие консистенции грунта естественного сложения), И.П. Иванова [11] (предложил теорию естественной прочности грунта), Л.И. Кульчицкого [12] и др. Особое (определяющее) значение имели теория контактных взаимодействий в грунте (физико-химическая механика природных дисперсных сред) и «теория эффективных напряжений в грунтах», разработанная В.И. Осиповым [13-15].

Значительный вклад в теорию пенетрационных испытаний грунтов внесли В.Ф. Разоренов [17] и Е.Н. Богданов [2, 3].

Исходным материалом для определенного обобщения послужили результаты многолетних лабораторных исследований свойств глинистых грунтов территории Санкт-Петербурга (около 10 000), проводившихся как в правовом поле общефедеральных нормативных документов (ГОСТ), так и по оригинальным методикам определения физико-механических свойств грунтов, разработанным отечественными учеными – П.О. Бойченко [1] и И.П. Ивановым [11].

Консистенция грунта ненарушенного сложения

Ранее указывалось [8, 9], что *показатель консистенции грунта ненарушенной структуры* (C_v) наряду с гранулометрическим составом, естественной (природной) влажностью (W_E), плотностью грунта (ρ), плотностью частиц грунта (ρ_s) и числом пластичности (I_p) является важнейшим классификационным показателем – свойством грунта первого порядка, объективным критерием истории его образования и геологического развития, существующим вне зависимости от метода (способа) его определения.

Последовательная разработка теории контактных взаимодействий в грунте позволила В.И. Осипову в общем виде сформулировать основные положения относительно природы прочности грунтов. В предельно сжатом виде можно сказать, что природа прочности грунтов зависит от типа контактов между отдельными элементами грунтовой системы, прочности единичного контакта и количества контактов на единицу площади. Фактически речь идет о придании (в свете современных представлений физической и коллоидной химии) изначального физико-химического смысла механическим свойствам грунта. Таким образом, особенности текстуры и микростроения грунта при определении механических свойств выходят на первый план и становятся основополагающими. В связи с этим важным аспектом в понимании механических свойств грунта является понятийное разделение синонимических терминов «показатель текучести» (I_L) и «показатель консистенции грунта естественного сложения» (C_B), ибо это принципиально разные, по сути, показатели физико-химического состояния грунтов. Здесь также следует отметить, что основоположник грунтоведения В.В. Охотин [16], говоря о механических свойствах грунта, никогда не разделял их на прочностные и деформационные. Он использовал выражения «трение и сцепление в грунтах», «сопротивление грунтов вдавливанию», «сопротивление грунтов сжатию», тем самым, во-первых, подразумевая глубокую взаимосвязь между физико-химическими и механическими свойствами грунтов, во-вторых, рассматривая консистенцию грунта естественного сложения как один из основных показателей его состояния, в-третьих, принимая первичность трения и сцепления в грунте по отношению к его реакции на сжатие. Продолжая цепочку градации свойств грунтов применительно к целям строительства, логично было бы исходя из пионерных работ В.Е. Вознесенского [6] ввести третью градацию для механических свойств грунтов, т.е. разделять их на прочностные, деформационные и динамические.

Контактные взаимодействия в грунте естественного сложения

Для дальнейшего обсуждения данной проблематики необходимо кратко остановиться на вопросе о типе контактов в грунте.

Существующая градация пластичных глинистых грунтов по показателю текучести в нарушенном сложении ($I_L = 0,25; 0,50; 0,75$) весьма условна и используется в профессиональном сообществе для разделения всей линейки глинистых грунтов для удобства практического применения при проектировании зданий и сооружений. Все множество состояний грунта по количеству влаги разбито с шагом 0,25 на четыре группы. Строгое научное разделение здесь отсутствует. Достаточно сказать, что в 60-е годы XX века предлагался термин «полупластичные» грунты, что, в общем, не лишено формального смысла с точки зрения строительства. На современном этапе развития теоретического грунтоведения можно лишь уверенно говорить о двух точках перехода («критических точках состояния глинистого грунта»): $W_e > W_L$ и $W_e < W_p$ (где W_e – природная влажность грунта, W_L – его влажность на границе текучести, W_p – его влажность на границе раскатывания). В первой точке ($W_e > W_L$), по всей видимости, дальнейшие коагуляционные контакты меняются на ближние при сохранении в целом ячеистой микроструктуры грунта. Верхний предел пластичности – переход глинистого грунта из пластичного состояния в текучее, т.е. должно строго соблюдаться состояние «идеального сдвига», когда удельное сцепление $c = 0$ кгс/см² и угол внутреннего трения $\varphi \approx 0^\circ$

(расчетный 0° – суммарная огибающая линия разрушения образца грунта при сдвиге суммирует эквипотенциальные поверхности микросдвигов).

В настоящее время коагуляционные контакты подразделяются на дальние и ближние исходя из расстояний между твердыми частицами [13]. Нынешняя градация основана на инструментальной лабораторной оценке расстояний между частицами мономинеральных монтмориллонитовых паст в дистиллированной воде (типичной двухфазной системы). По всей видимости, в природных четырехфазных дисперсных системах (грунтах) такое разделение вряд ли уместно. Совершенно очевидно, что каждой из критических точек состояния глинистого грунта ($W_e > W_L$ и $W_e < W_p$) должен соответствовать свой тип контакта. На взгляд автора, классические коагуляционные контакты присущи только грунтам (минеральным – текучим глинам, органо-минеральным – илам), к которым применим критерий $W_e \geq W_L$. По определению, такие грунтовые разности не набухают и не размокают. Зеркально данное предположение можно соотнести с грунтами с переходными (фазовыми) контактами, которые при непосредственном контакте с водой также не размокают и не набухают. Все остальные связные дисперсные минеральные глинистые грунты корректно отнести к имеющим в своей структуре и коагуляционные (дальние и ближние), и переходные (фазовые) контакты с подавляющим преимуществом первых. В целом можно утверждать, что грунт с переходными (фазовыми) контактами в воде не размокает и не набухает, грунт с переходными (фазовыми) и коагуляционными контактами в зависимости от минерального состава твердой фазы может и набухать, и размокать, грунт только с коагуляционными контактами также не набухает и не размокает.

Во второй точке ($W_e < W_p$) количество точечных контактов по отношению к коагуляционным переходит в критическое количество, и грунт теряет всякую способность к пластическим деформациям, т.е. коагуляционные контакты в грунтовой системе сменяются на переходные (точечные).

Физико-химический смысл остальных градаций ($I_L = 0,25; 0,50; 0,75$) пока не установлен, если он вообще существует. По всей видимости, имеет место плавное и постепенное уменьшение коагуляционных контактов на отрезке $W_p \rightarrow W_L$. В связи с этим остается открытым ряд вопросов с точки зрения физико-химической механики дисперсных сред. Важнейший из них: соответствуют ли существующие методы лабораторного определения верхнего и нижнего предела пластичности грунтов их истинному физико-химическому состоянию? Скорее всего нет.

Показатель консистенции C_v для грунтов ненарушенной структуры определяется при помощи конуса методом лабораторной пенетрации. П.О. Бойченко моделировал поведение грунта при одноплоскостном срезе, добиваясь значений прочностных параметров, характерных для «идеального сдвига» – $c = 0$ кгс/см² и $\varphi \approx 0^\circ$. Грунтовые пасты с определенными (на аппаратуре 1950-х годов) значениями этих параметров ($c = 0,019 \div 0,031$ кгс/см²; $\varphi \approx 0^\circ$) повторно испытывались на пенетрометре с использованием падающего конуса постоянного веса с углом раскрытия 30° и массой 300 г. При этом глубина погружения определялась с точностью до 0,1 мм. Для перехода к состоянию $W_e > W_L$ глубина погружения конуса в грунт соответствует 32 мм. Принятый в настоящее время метод определения верхнего предела пластичности (конусом Васильева с углом при вершине 30° и массой 76 г) использует состояние грунта со сцеплением $c = 0,035 \div 0,052$ кгс/см² [1]. Для этого состояния глубина погружения конуса в грунт составляет 22,5 мм. Как видно из этих чисел, истинные величины влажности грунта на границе текучести W_L занижены примерно 1,5-2 раза.

Таким образом, на основе высказанных выше предположений и типах контактов в грунте можно все множество состояний глинистых грунтов в зависимости от показателя консистенции C_B разбить на три большие группы:

- 1) $C_B > 1,0$ – грунты с коагуляционными контактами;
- 2) $C_B = 1 \div 0$ – грунты с переходными контактами;
- 3) $C_B < 0$ – грунты с фазовыми (точечными) контактами.

Совершенно очевидно, что для каждого типа контактов в глинистом грунте необходимо применять свой метод лабораторного определения механических свойств: для первой группы – испытания крыльчатым зондом, для второй – одноплоскостной срез, для третьей – одноосное раздавливание. Однако эти вполне очевидные положения не в полной мере отражены в существующей нормативной литературе.

Пенетрация грунтов одним усилием – конусом постоянной массы

Зная научно обоснованные критические точки состояния грунта ($W_p = 4$ мм, $C_B = 0$ и $W_L = 22,5$ мм, $C_B = 1$), можно легко определить консистенцию грунта естественного сложения методом пенетрации конусом постоянной массы. Таким образом всю линейку грунтов естественного сложения можно разделить так, как показано в таблице 1. Значения показателя текучести грунтов нарушенного сложения (I_L), как правило, отличаются от величин показателя их консистенции (C_B) в ненарушенном сложении. Классификация их состояния (консистенции) по I_L при нарушенном сложении и по C_B при ненарушенном представлена в таблице 2 (по ней можно оценить также соотношение этих показателей).

Таблица 1. Классификация грунтов по показателю консистенции при ненарушенном сложении (по [1])

Глубина погружения конуса h , мм	Консистенция	Показатель консистенции при ненаруш. сложении C_B
$< 1,2$	твердая	$< -0,25$
$1,2-4,0$	полутвердая	$-0,25-0$
$4,0-7,4$	тугопластичная	$0-0,25$
$7,4-16,3$	мягкопластичная	$0,25-0,75$
$16,3-22,5$	текучепластичная	$0,75-1,00$
$> 22,5$	текучая	$> 1,00$

Таблица 2. Классификация состояния грунтов по показателям текучести I_L и консистенции C_B

Показатель текучести I_L	Показатель консистенции при ненаруш. сложении C_B	Консистенция
< 0	$< -0,25$	твердая
$0-0,25$	$-0,25-0$	полутвердая
$0,25-0,50$	$0-0,25$	тугопластичная

0,50–0,75	0,25–0,75	мягкопластичная
0,75–1,00	0,75–1,00	текучепластичная
> 1,00	> 1,00	текучая

Для оценки естественного состояния грунта вводится *показатель структурный прочности*:

$$K_{cn} = C_B - I_L. \quad (1)$$

По этому простому показателю грунты можно разделить на три группы:

- 1) структурно устойчивые ($K_{cn} > 0$);
- 2) структурно неустойчивые ($K_{cn} \leq 0$);
- 3) структурно однородные ($K_{cn} = 0$).

Таким образом, сравнение показателей I_L и C_B дает возможность оценить структурную прочность грунта.

Итак, зная две «критические точки состояния грунтов» ($W_e > W_L$ и $W_e < W_p$), можно построить графики зависимости «удельное сцепление – показатель консистенции грунта естественного сложения» (рис. 1) и получить распределение типов контактов в зависимости от прочности для каждой разновидности глинистого грунта. Подчеркнем, что номограмма, представленная на рисунке 1, построена исходя из ныне существующей градации типов контактов в грунте. Очевидно, что в природных грунтах переходные контакты (в той или иной мере) будут присутствовать при $1,0 > C_B > -0,25$.

На рисунке 2 представлены зависимости «показатель консистенции грунта естественного сложения – удельное сцепление» применительно к конкретным грунтам. Из рисунка видно, что переход через вторую критическую точку грунта ($W_e < W_p$) у разных разновидностей глинистых грунтов различен: у супеси удельное сцепление в этой точке составляет 0,20 кгс/см², у суглинков – 0,25 кгс/см². По результатам лабораторных определений построены только графики для суглинков и супесей. В силу того, что классические глины на территории Санкт-Петербурга практически отсутствуют, график для глин, показанный на рисунке 2, носит теоретический характер и должен будет быть подтвержден экспериментальными исследованиями. Пока, по всей видимости, стоит ожидать, что сцепление глин будет лежать в диапазоне 0,25-0,30 кгс/см². Вполне вероятно, что данные значения соответствуют минимальной начальной прочности фазовых контактов в грунте.

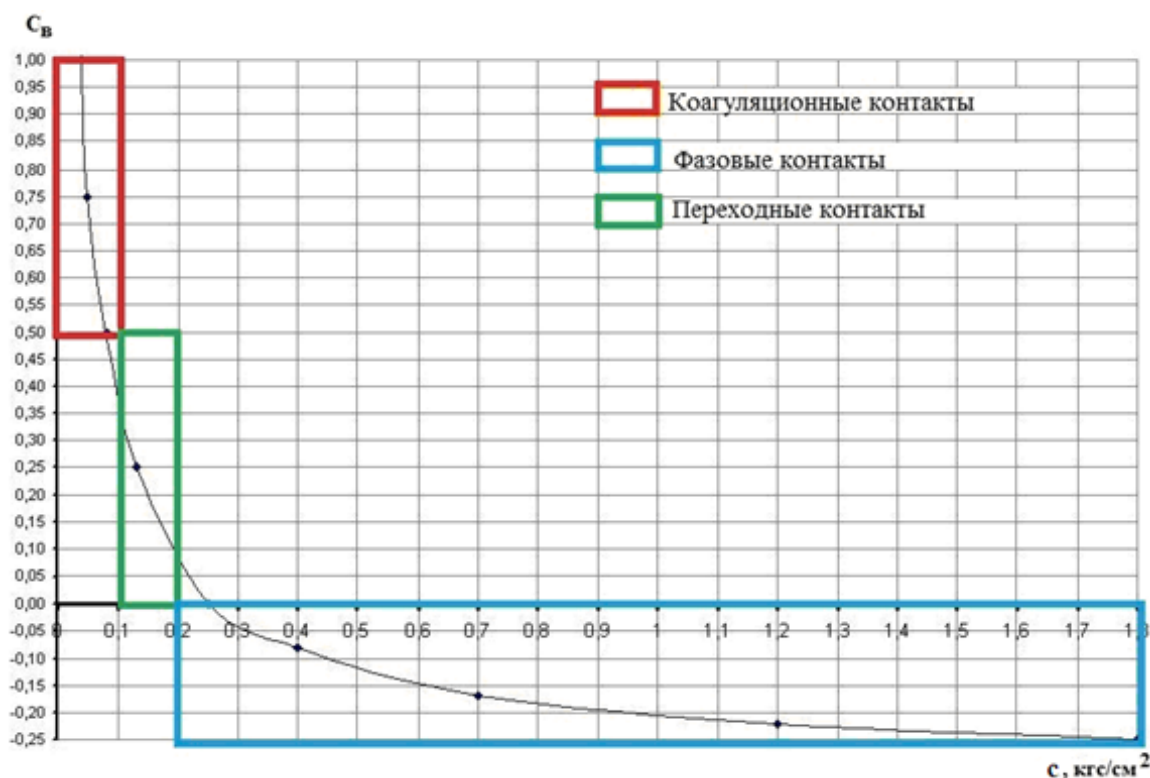


Рис. 1. Распределение типов контактов в зависимости от консистенции грунта по зависимости «показатель консистенции грунта естественного сложения C_v – удельное сцепление c »

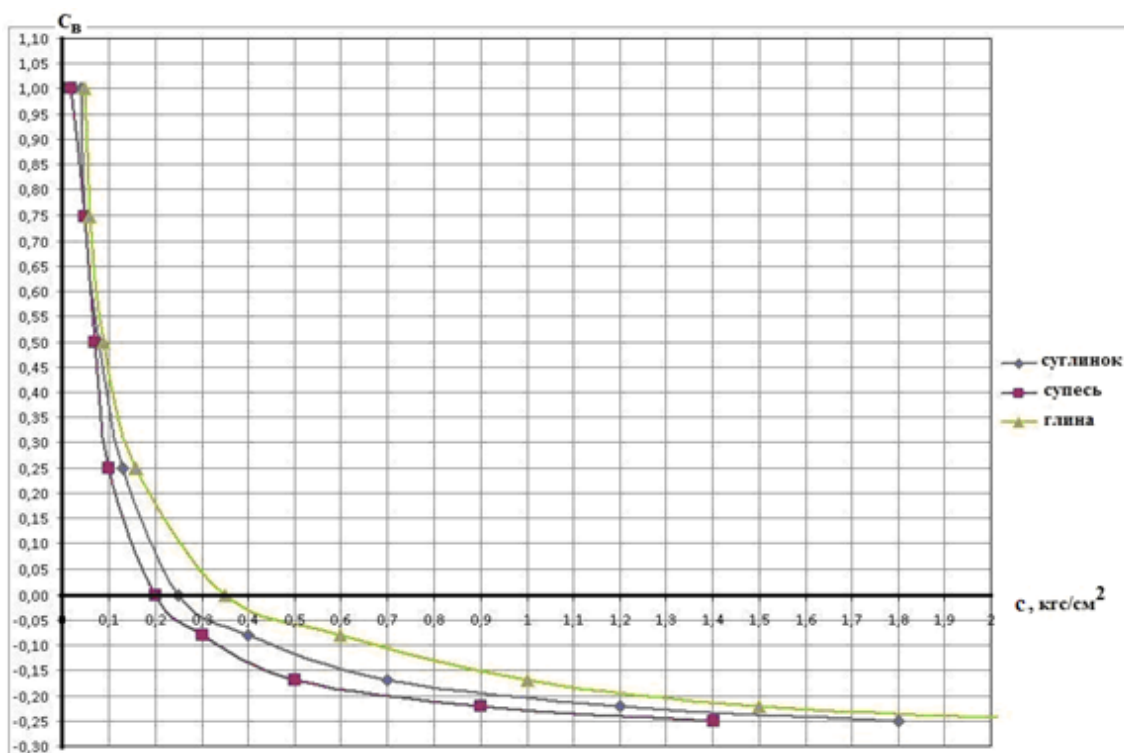


Рис. 2. Зависимости «показатель консистенции грунта естественного сложения C_v – удельное сцепление c » для трех разновидностей минеральных глинистых грунтов

Прочностные свойства грунтов

В связи с вышеизложенным совершенно особое значение приобретает *теория естественной прочности грунта* [11]. Согласно ей, грунт реагирует на внешние воздействия начиная (и заканчивая также) с какой-то определенной величины. И эта величина зависит прежде всего от исходного состояния грунта. Сущность метода определения естественной прочности заключается в правильном выборе нормальных давлений, значения которых должны находиться в строго определенном для данного грунта интервала и не вызывать, с одной стороны, растягивающих напряжений, а с другой – доуплотнения грунта или появления порового давления. Нормальные давления должны находиться в диапазоне от сигма минимальной (σ_{min}) до сигма максимальной (σ_{max}). При нормальных давлениях менее σ_{min} возникают растягивающие напряжения, что занижает сопротивление сдвигу. При давлениях более σ_{max} изменяется исходное физическое состояние грунта - неводонасыщенный грунт доуплотняется, что приводит к увеличению его прочности, а у водонасыщенного грунта возникает поровое давление, что приводит к снижению его прочностных характеристик.

Таким образом, увязав теорию естественной прочности грунта с показателем его консистенции в естественном сложении, мы можем с помощью этой характеристики выбирать научно обоснованные величины вертикальных давлений при проведении сдвиговых испытаний (методом одноплоскостного среза) (табл. 3). В общем виде смысл таблицы 3 сводится к возможности определения по ней прочностных и деформационных характеристик дисперсного минерального глинистого грунта по его разновидности и показателю консистенции.

Подчеркнем, что вертикальные нагрузки, приложенные к грунту при проведении сдвиговых испытаний, позволяют определить истинные значения трения и сцепления в нем (основные показатели механических свойств) без нарушения исходного типа его микростроения.

Графики, аналогичные вышерассмотренным, можно построить в системе координат «показатель консистенции грунта естественного сложения C_v – недренированная прочность c_u » (рис. 3). На рисунке 4 представлены зависимости удельного сцепления c и угла внутреннего трения ϕ от показателя консистенции C_v .

Таблица 3. Сводная таблица показателей физико-механических свойств грунтов с учетом их консистенции при естественном сложении (ожидаемые прочностные и деформационные характеристики глинистых грунтов)

Показатель текучести I_L (консистенция)	Глубина погружения конуса h , мм	Показатель консистенции C_v (консистенция)	Вертикальная нагрузка P , кгс/см ²	Прочностные характеристики ϕ , град, / c , кгс/с м ²	Модуль деформации и в условиях естественн ой прочности (ЕП) E , кгс/см ²	Недренирова нная прочность c_u , кгс/см ²
---	---------------------------------------	--	--	---	---	---

				супесь	суглин ок	глина	суглин ок	супесь	суглин ок	супесь
> 1 (текучая)	> 22,5	> 1	-	-	-	-	-	-	-	-
	22,5÷ 16,2	0,75÷1,0 0 (текучеп ласт,)	0,125÷0,2 5÷0,50	5/0, 02	4/0, 04	2/0, 05	<5	-	< 0,05	< 0,05
	16,2÷ 11,3	0,50÷0,7 5 (мягкопл аст,)	0,25÷0,50 ÷0,75	6/0, 05 9/0, 05	5/0, 05 7/0, 07	4/0, 06 5/0, 08	5÷10	< 15	0,05÷ 0,16	0,05÷ 0,12
0,75÷1,0 0 (текучеп ласт,)	11,3÷ 7,4	0,25÷0, 50 (мягкопл аст,)	0,25÷0,50 ÷0,75	10/0 ,07	8/0, 08	6/0, 09	10÷3 0	15÷4 0	0,16÷ 0,40	0,12÷ 0,35
0,50÷0,7 5 (мягкопл аст,)				16/0 ,1	13/0 ,13	10/0 ,16				
0,25÷0,5 0 (тугопла ст,)	7,4÷4	0÷0,25 (тугопла ст,)	0,5÷1,0÷1, 5	17/0 ,11	14/0 ,14	1/0, 17	30÷8 0	40÷1 30	0,40÷ 1,00	0,35÷ 0,90
0÷0,25 (полутве рд,)				25/0 ,20	20/0 ,25	15/0 ,35				
0÷0,25 (полутве рд,)	4÷3	-0,25÷0 (полутве рд,)	1,0÷1,5÷2, 0	26/0 ,23 30/0 ,30	21/0 ,30 25/0 ,45	16/0 ,40 18/0 ,60	80÷1 20	130÷ 220	1,0÷1, 5	0,9÷1, 3
< 0 (твердая	3,0÷1, 7		1,0÷2,0÷3, 0	31/0 ,40 34/0 ,80	26/0 ,50 28/1 ,00	19/0 ,70 24/1 ,50	120÷ 200	220÷ 300	1,5÷2, 2	1,3÷0, 9
< -0,5 (твердая)	<1,7		2,0- 3,0÷4,0- 5,0	34/0 ,90 35/1 ,20	29/1 ,20 30/1 ,60	25/1 ,50 25/1 ,90	200÷ 250	> 300	2,2÷2, 7	2,0÷2, 4
	<1,2		2,0÷4,0÷6, 0	-	-	-	> 250		> 2,7	> 2,4

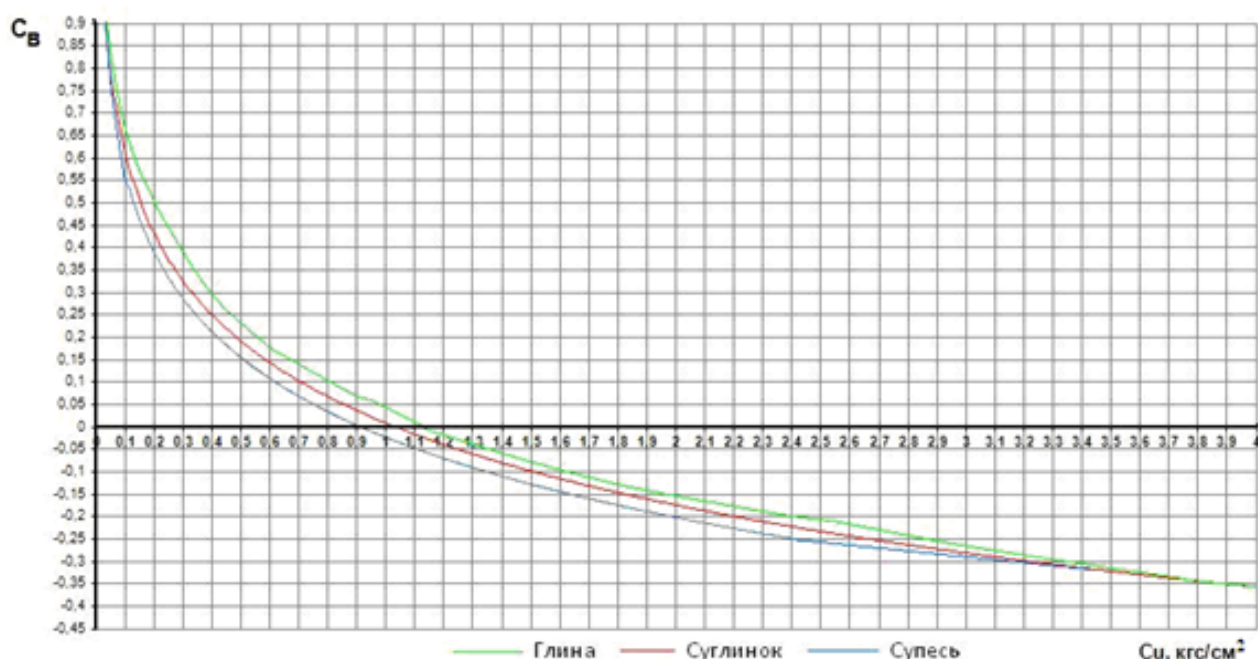


Рис. 3. Зависимости «показатель консистенции грунта естественного сложения C_v – недренированная прочность C_u » для трех разновидностей минеральных глинистых грунтов

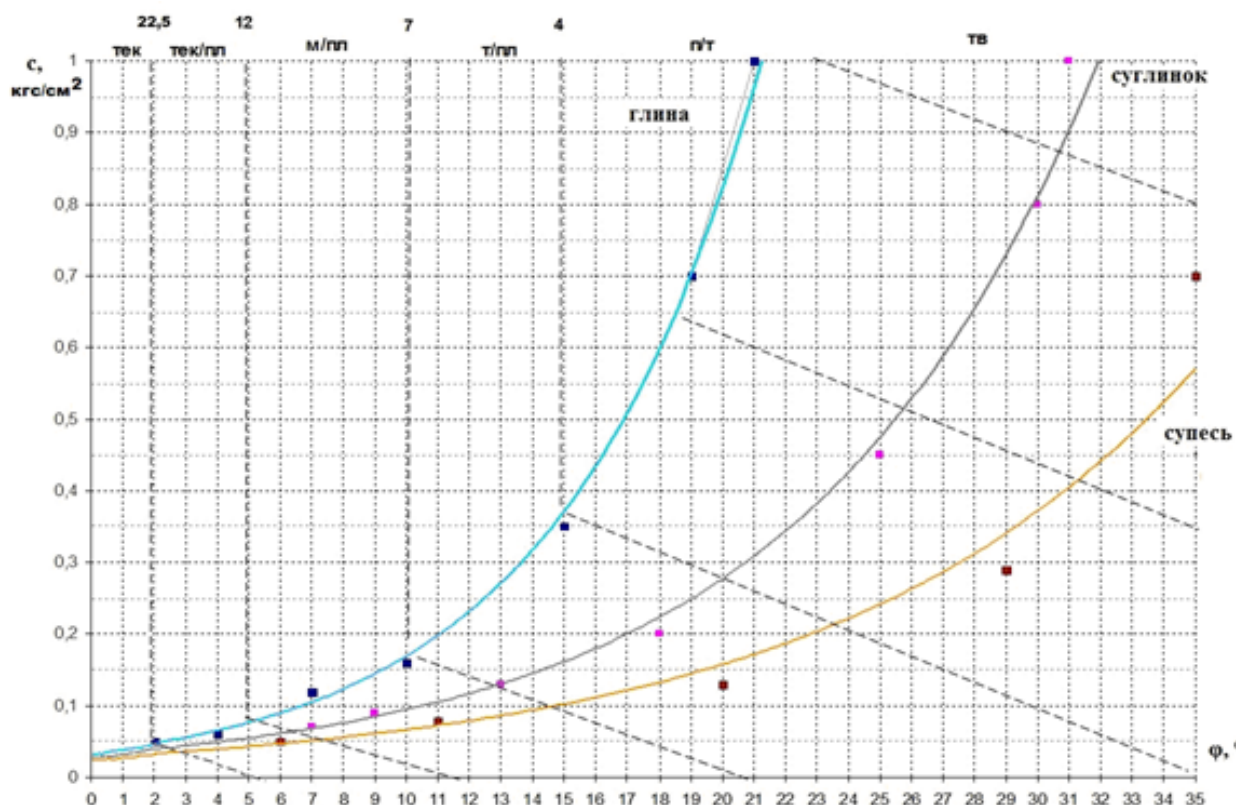


Рис. 4. Графики зависимости «показатель консистенции грунта естественного сложения C_v – удельное сцепление c – угол внутреннего трения ϕ » для трех разновидностей минеральных глинистых грунтов. Консистенция: тек – текучая; тек/пл – текучепластичная; м/пл – мягкопластичная; т/пл – тугопластичная; п/т – полутвердая; тв – твердая

Деформационные свойства грунтов

Относительно реакции грунта на сжатие при приложении вертикальной нагрузки в свете его показателя консистенции при естественном сложении картина складывается практически аналогично: деформация грунта зависит от его микростроения и типа структурных связей. Следовательно, недопустимо рассматривать данный вопрос в отрыве от контекста физико-химической теории контактных взаимодействий в грунте.

Анализируя полученные результаты экспериментальных исследований грунтов с помощью конуса постоянной массы, мы вправе выделить категории грунта по показателю текучести (I_L) и консистенции при естественном сложении (C_B). Весь спектр состояния грунтов (от твердых до текучих) можно разбить на 10 категорий (от минус V до V). Соотношение показателей I_L , C_B и предлагаемых категорий с учетом природных структурных связей представлено в таблице 4.

Таблица 4. Категории глинистых грунтов по показателям их консистенции при естественном сложении (C_B) и текучести при нарушенном сложении (I_L)

Консистенция	I_L	C_B	Деформации	Категория
	-	-	хрупкие	-V
	-0,75÷-1,00	-	хрупкие пластичные	-IV
	-0,50÷-0,75	-		-III
	-0,25÷-0,50	-		-II
Твердая	0÷-0,25	<-0,25		-I
	0	0		
Полутвердая	0÷0,25	-0,25÷0		I
Тугопластичная	0,25÷0,50	0÷0,25		II
Мягкопластичная	0,50÷0,75	0,25÷0,75		III
Текучепластичная	0,75÷1,00	0,75÷1		IV
Текучая	>1,00	>1	текучие	V

Таким образом, вырисовывается достаточно стройная «зеркальная» картина в ранжировании показателя текучести грунтов нарушенного сложения – от минус V до + V. Причем на область пластических деформаций падает львиная доля категорий грунта – 8. Две крайние категории соответствуют в одном случае дальним коагуляционным (текучая консистенция, категория + V) и цементационным (хрупкие деформации, категория минус V) контактам.

Подчеркнем, что предлагаемая градация грунтов в зависимости от их природного состояния увязывает, как кажется автору, в единое целое гранулометрический состав и физико-химические свойства грунтов первого порядка (естественную влажность, плотность и консистенцию) с их природными (естественными) механическими характеристиками.

Видимо, в игнорировании типов контактов и микростроения грунта заключаются все те противоречия между теоретически рассчитанными значениями деформаций водонасыщенных глинистых грунтов и реальной инженерной практикой, которые вылились в проблему консолидации грунтов.

На взгляд автора, разделение общей консолидации грунта на первичную (фильтрационную) и вторичную (структурную) весьма условно.

Консолидация, как и коэффициент фильтрации, – строительная характеристика грунта. В самом деле, весьма сложно (невозможно) представить деформацию структуры грунта даже при нагрузке 6 кгс/см^2 . В принятой методике проведения компрессионных испытаний существует некий начальный аппаратный порог, фиксирующий регистрацию начала изменения (уменьшения) высоты исходного образца грунта в одометре под воздействием вертикально прилагаемой нагрузки.

Фиксируемые деформации ($0,01 \text{ мм}$) более чем хорошо вписываются в пределы погрешности прибора ($0,05\%$) и свидетельствуют о том, что грунт неоднороден по текстурно-структурным особенностям и закону одномерного уплотнения не подвластен. Пористость (от макро- до ультрамикропор) в единице объема грунта распространена неравномерно и хаотично – и именно это перераспределение пористости в образце фиксируется мессурой при компрессионных испытаниях. Это подтверждается данными изучения микростроения грунтов. Величины пористости, полученные при анализе изображений, сделанных с помощью растрового электронного микроскопа, никогда не соответствуют результатам прямого расчета общей пористости. При достижении какой-то определенной величины нормального давления более крупные поры просто меняют свои размеры и геометрию, разделяясь на более мелкие и тем самым отражая уменьшение вертикального размера испытываемого образца.

Одна из стратегических задач генетического грунтоведения – аппаратно установить тренд закрытия пор в образце грунта при приложении нагрузки. Логическая цепочка изменения геометрии порового пространства при приложении внешней нагрузки «макропоры → мезопоры → микропоры → ультрамикропоры» должна быть экспериментально доказана в жесткой привязке к состоянию грунта ($W_e > W_l$; $W_e < W_l$; $W_e = W_l$; $W_e = W_p$), т.е. при различных I_L и C_B -- как принятых в современных нормативных документах, так и теоретически рассчитанных исходя из положений физико-химической механики дисперсных сред. Только после проведения экспериментов (3D-томографии как модельных, так и реальных грунтов) понятие «консолидация грунта» получит строгое грунтоведческое (цифровое) наполнение. Пока же консолидация грунта, рассчитывается только математически (как правило, по формуле Тейлора) по сложившейся парадигме определения деформационных свойств грунтов (чаще в компрессионных приборах, реже в стабилометрах).

Именно в данном контексте (критического анализа определения механических свойств грунтов) необходимо рассматривать работу В.И. Осипова, Ф.С. Карпенко и Н.А. Румянцевой [15], в которой было уточнено понятие «активная пористость грунта». Следовательно, сопротивление грунта сжатию – это та максимальная нагрузка, при которой он не теряет своих изначальных физико-химических и структурных параметров, т.е. при максимально допустимой вертикальной нагрузке σ_1 естественная влажность W_e , показатель консистенции грунта природного сложения C_B , пористость n и микростроение не меняются.

Таким образом, с большой долей достоверности мы можем определить только начало деформации грунта природной консистенции в естественном сложении. Например, для мягкопластичных суглинков модуль деформации $E = 10 \text{ кгс/см}^2$ при $C_B = 0,5$. Исходя из типа микростроения («ближних коагуляционных» контактов по Соколову [21] и «переходных» по сути) меньше он быть априори не может. При приложении же бо́льшей вертикальной нагрузки (после наступления стабилизации после предыдущей нагрузки)

может. Только это будет уже совсем другой показатель, не имеющий отношения к природным характеристикам грунта.

Графики зависимости модуля деформации E от показателя консистенции грунта естественного сложения C_B (рис. 5) часто неформально называют «парусами деформаций». Они и правда чем-то напоминают силуэт скользящего по воде люггера (англ. *lugger*) – трехмачтового судна с рейковым парусным вооружением. Выражение «паруса деформаций» употребляется, например, в среде петербургских грунтоведов.

Логарифмическая кривая для глин в данном случае, как и в случае зависимостей C_B от сцепления c , носит вероятностный характер и требует верификации на основе лабораторных исследований.

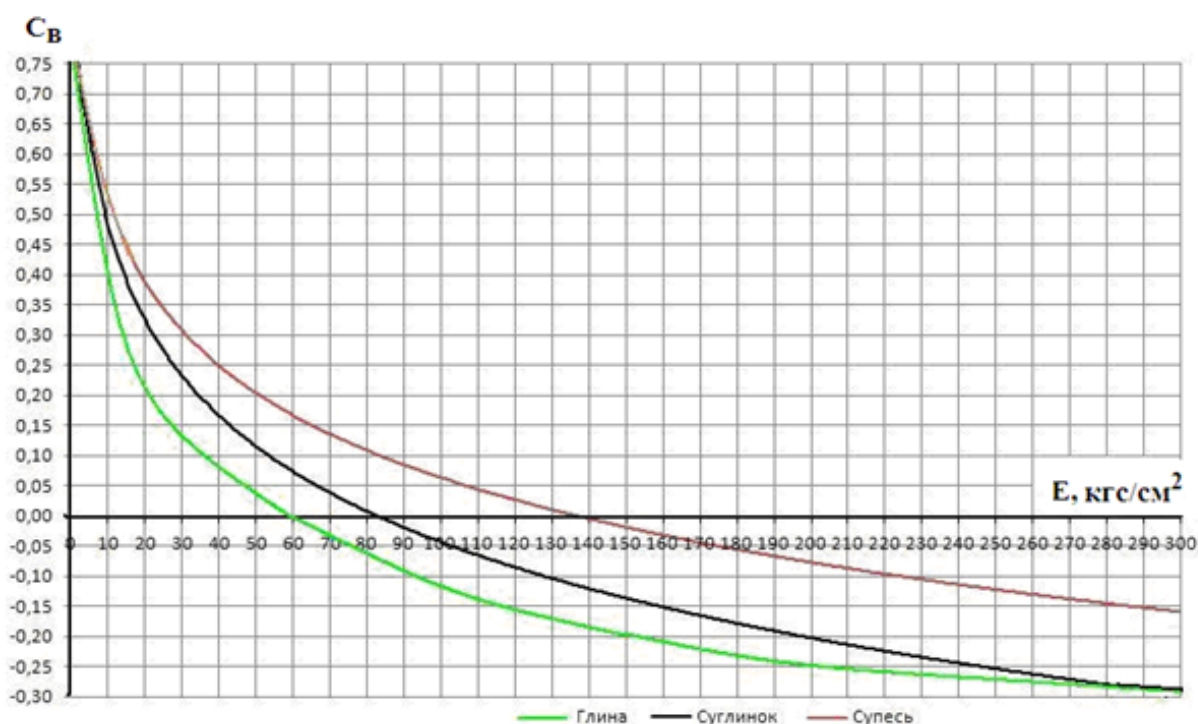


Рис. 5. Зависимости «показатель консистенции грунта естественного сложения C_B – модуль деформации E » для глинистых грунтов («паруса деформаций»)

Таким образом, сопротивление грунта сжатию (механическая или грунтоведческая характеристика) и его деформационные свойства (строительные характеристики) опять-таки не синонимы, а очень близкие понятия.

Таким образом, суммируя полученные результаты исследований по прочности и деформируемости глинистых грунтов методом лабораторной пенетрации, значения удельного сцепления (c), угла внутреннего трения (ϕ), недренированной прочности (c_u) и модуля деформации (E) в зависимости от показателя консистенции при естественном сложении (C_B) для «второй критической точки» глинистого грунта ($W_e < W_p$) можно представить в виде таблицы 5.

Таблица 5. Значения прочностных и деформационных свойств разновидностей глинистого грунта в зависимости от показателя консистенции при естественном сложении (C_B) для «второй критической точки» ($W_e < W_p$)

Разновидность глинистого грунта	Удельное сцепление c , кгс/см ²	Угол внутреннего трения ϕ , град.	Недренированная прочность c_u , кгс/см ²	Модуль деформации E , кгс/см ²
Супесь	0,20	25	0,9	140
Суглинок	0,25	20	1,0	85
Глина	0,30	15	1,1	60

Необходимо оговориться, что в данной статье рассматриваются *обобщенные* зависимости между показателями свойств глинистых грунтов только на уровне таких разновидностей, как «супесь», «суглинок» и «глина». Безусловно, влияние гранулометрического состава на консистенцию, естественную прочность и деформируемость грунтов весьма и весьма значительно. Данному вопросу будет посвящена отдельная работа, где более подробно будут рассмотрены вышеупомянутые зависимости применительно к таким грунтовым разностям, как «суглинок тяжелый пылеватый», «супесь легкая пластичная» и т.д.

Выводы

1. Проведенные исследования позволили существенно уточнить природу структурных связей в грунтах и увязать такие понятия, как «естественная прочность грунта», «теория контактных взаимодействий», «физико-механические свойства грунта». Фактически речь идет о новом подходе к выявлению взаимосвязи состояния грунта (консистенции грунта ненарушенного сложения) с его прочностными и деформационными свойствами.
2. Предлагаемая методика определения трения, сцепления и сопротивления грунта сжатию с помощью пенетрации конусом постоянной массы вытекает из современных представлений о понятии «грунт», базирующихся на физико-химической теории дисперсных сред и в общем виде сформулированных В.И. Осиповым. На взгляд автора, это первые практические выводы, следующие из теории контактных взаимодействий в дисперсных глинистых грунтах. Посему надеемся, что здравый смысл все-таки возобладает и практика лабораторных испытаний грунтов для строительства получит научно обоснованную методику определения прочностных свойств грунтов, основанную на параллельном определении этих параметров по двум методикам: по теории естественной прочности грунта контактных взаимодействий и по одной из трех методик – неконсолидированно-недренированной (НН), консолидированно-недренированной (КН) или консолидированно-дренированной (КД), регламентируемых ныне действующим нормативным документом [6]. Причем вторая схема испытаний грунта (либо НН, либо КН, либо КД) будет предлагаться непосредственно проектировщиками (геотехниками) исходя из той нагрузки, которую по их представлениям будет испытывать грунт под действием веса конкретного сооружения. При применении подобного подхода к исследованию механических свойств грунтов (принцип «двух схем») понятие «геотехнический мониторинг» приобретет наконец конкретный смысл, одной из задач которого является достоверное прогнозирование динамики изменения показателей физико-механических свойств грунтов до, вовремя и после строительства того или иного инженерного сооружения.

По согласованию с геолого-геодезической службой Комитета по градостроительству и архитектуре Администрации Санкт-Петербурга, а также аналогичной структурой

Ленинградской области, данные показатели (C_B и R) включаются в отчетные материалы по результатам инженерных изысканий и принимаются контролирующими и проверяющими органами всех уровней.

3. «Паруса деформаций» позволяют предварительно оценить прочностные и деформационные свойства грунтов в полевых и лабораторных условиях. Пока предварительно. При существующем сейчас состоянии отечественной нормативной базы в сфере определения физико-механических свойств грунтов прямое применение пенетрации в практике лабораторных испытаний грунтов при инженерных изысканиях для строительства не предусмотрено. По согласованию с геолого-геодезической службой Комитета по градостроительству и архитектуре Администрации Санкт-Петербурга, а также аналогичной структурой Ленинградской области, данные показатели (C_B и R) включаются в отчетные материалы по результатам инженерных изысканий и принимаются контролирующими и проверяющими органами всех уровней. За 40 лет применения пенетрационных испытаний в практике лабораторных исследований накоплен и обобщен колоссальный фактический материал (более 500 000 определений), построены номограммы и зависимости удельного сцепления c , угла внутреннего трения φ , недренированной прочности c_u и модуля деформации E от сопротивления грунта сжатию R и показателя консистенции при естественном сложении C_B . Значения c , φ , c_u и E , определенные на основании пенетрационных испытаний, полностью сопоставимы с результатами, полученными другими методами (в срезных, компрессионных приборах и стабилометрах) с доверительной вероятностью 0,95.

4. Существующие схемы определения прочностных свойств грунтов – строительные и только строительные, что, впрочем, несколько не умаляет их значения в практике лабораторных испытаний грунтов для производственных целей.

5. Существующие схемы определения прочностных свойств грунтов (неконсолидированно-недренированная, консолидированно-недренированная, консолидированно-дренированная – НН, КН, КД) ни в коем случае не соответствуют естественным (природным) свойствам грунта, включая тип его микростроения и тип структурных связей.

6. В практическом плане (при инженерных изысканиях для строительства) выявленные зависимости (c , φ , c_u и E от C_B) позволяют получать вполне удовлетворительные значения прочностных и деформационных характеристик, необходимые для проектирования и строительства любых инженерных сооружений.

7. По всей видимости, на сегодняшний день теория естественной прочности (ЕП), дополненная контактными взаимодействиями (естественная прочность контактных взаимодействий – ЕПКВ), это единственная приемлемая платформа для начала решения важнейших стратегических задач грунтоведения – создания всеобъемлющего атласа грунтов и серьезной корректировки существующих региональных таблиц показателей физико-механических свойств грунтов. Создание такого атласа вытекает из поступательного развития грунтоведения как фундаментальной науки геологического цикла и прямо следует из колоссального объема накопленных фактов, требующих обобщения.

8. Наберемся смелости и дополним главный закон грунтоведения: *«физико-механические свойства грунта есть функция геологической истории его существования. Они определяются его минеральным и гранулометрическим составом, химическим составом порового раствора и типом контактов между отдельными элементами грунтовой системы».*

Автор благодарит Л.К. Семенову, за помощь в подготовке данной работы.

Список литературы

1. *Бойченко П.О.* Определение пределов пластичности и консистенции глинистых грунтов методом конуса. Л.: Изд-во ЛГУ, 1964. 47 с.
2. *Богданов Е.Н., Иванов И.П., Руднева И.Е.* Применение пенетрации при сдвиговых испытаниях грунтов естественной прочности. – В сб. «Современные методы определения механических характеристик слабых грунтов». Л., ЛДНТП, 1979, с. 52-56.
3. *Богданов Е.Н.* О механических свойствах глинистых грунтов. Грунтоведение. 2012, № 1, с. 62-70.
4. *ГОСТ 25100-2011.* Грунты. Классификация. М.: Стандартиформ, 2013. 38 с.
5. *ГОСТ 5180-84.* Грунты. Методы определения физических характеристик. М., Издательство стандартов, 1985. 24 с.
6. *ГОСТ 12248-2010* Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартиформ, 2010. 78 с.
7. *Дерягин Б.В. Чураев Н.В. Муллер В.М.* Поверхностные силы. М., Наука, 1987, 398 с.
8. *Здобин Д.Ю., Семенова Л.К.* Показатель текучести и консистенция – основные физико-химические показатели состояния грунтов. Инженерные изыскания, 2013, № 5, с. 28-33.
9. *Здобин Д.Ю.* О консистенции грунтов естественного сложения. 17 Сергеевские чтения, М., 2015, с. 554-561.
10. *Иваникова Н.П.* Методы исследования механических свойств грунтов. СПб, СПбГУ, 1996, 93 с.
11. *Иванов И.П.* Определение показателей сопротивления сдвигу грунтов характеризующих их естественную прочность. Вестник ЛГУ, 1975, № 6, с. 73-79.
12. *Кульчицкий Л.И. Габитов Ф.Г.* Методы исследования свойств глинистых грунтов. Адильоглы, Баку, 2004, 185 с.
13. *Осипов В.И., Соколов В.Н.* Глины и их свойства. М., ГЕОС, 2013, 576 с.
14. *Осипов В.И.* Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. Грунтоведение. 2013, № 2, с. 3-35.
15. *Осипов В.И., Карпенко Ф.С., Румянцева Н.А.* Активная пористость и ее влияние на физико-механические свойства глинистых грунтов. Геоэкология, 2014, №3, с. 262-269.
16. *Охотин В.В.* Грунтоведение. СПб, ЦГГ, 2008, 231 с.
17. *Разоренов В.Ф.* Пенетрационные испытания грунтов. М., Стройиздат, 1968, 182 с.
18. *Рибиндер П.А. Семененко Н.А.* О методике погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств пластично-вязких тел. Доклады АН СССР, т. 64, 1949.
19. *РСН 51-84.* Инженерные изыскания для строительства. Производство лабораторных исследований физико-механических свойств грунтов. М., Госстрой РСФСР, 1984, 38 с.
20. *Соколов В.Н.* Инженерно-геологическая классификация микроструктур глинистых пород. Инженерная геология, 1988, № 4, с. 25-41.
21. *Соколов В.Н.* Модели микроструктур глинистых грунтов. Инженерная геология. 1991. №6, с. 32-40.
22. *Терцаги К., Пек Р.* Механика грунтов в инженерной практике. Госстройиздат, 1958, 608 с.

- 23. *CEN ISO/TS 17892-6* Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 6: Fall cone test.
- 24. *D3441-98* Standard Test Method for Deep, Quasi-Static, Cone and Friction-Cone Penetration Tests
- 25. *D5778-95 (2000)* Standard Test Method for Performing Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils.
- 26. *NF P94-052-1:1995* Sols: Reconnaissance et Essais – Determination des limites d'Atterberg – Partie 1: Limite de liquidite – Methode du cone de penetration.
- 27. *SS 02 7125:1991* Geotechnical test methods. Undrained shear strength. Fall cone test cohesive soil.