



# ЕСТЕСТВЕННАЯ ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ. ЧАСТЬ 1

## THE NATURAL STRENGTH AND DEFORMABILITY OF CLAY SOILS. PART I

### ЗДОБИН Д.Ю.

Старший научный сотрудник лаборатории географии почв Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, ученый секретарь Охотинского общества грунтоведов, к.г.-м.н., г. Санкт-Петербург, [zdobin\\_soil@mail.ru](mailto:zdobin_soil@mail.ru)

### ZDOBIN D.Yu.

Senior staff scientist of the Soil Science Laboratory of the Earth Sciences Institute of St. Petersburg State University, academic secretary of the «Okhotin Society of Soil System» Regional Public Scientific Organization, PhD (candidate of science in Geology and Mineralogy), St. Petersburg, [zdobin\\_soil@mail.ru](mailto:zdobin_soil@mail.ru)

### Ключевые слова:

грунты; типы контактов между частицами грунта; физико-механические свойства; показатель консистенции грунта естественного сложения; удельное сцепление; угол внутреннего трения; модуль деформации; пенетрация конусом постоянной массы; взаимосвязь параметров; естественная прочность; естественная деформируемость.

### Key words:

soils; types of contacts between soil particles; physical-mechanical properties, consistency index of soil of natural constitution; specific cohesion; angle of internal friction; modulus of deformation; penetration by a cone of constant mass; relationship between parameters; natural strength; natural deformability.

### Аннотация

На основе работ П.О. Бойченко, И.П. Иванова, В.И. Осипова рассматриваются вопросы прочности и деформируемости глинистых грунтов в свете контактных взаимодействий. Анализируется их свойство первого порядка — консистенция грунта естественного сложения. На основе понятия «критическая точка состояния грунта» впервые предлагается теория естественной прочности грунта на основе контактных взаимодействий. Предлагается экспресс-метод определения показателей прочностных и деформационных свойств глинистых грунтов путем пенетрации одним усилием с использованием конуса постоянной массы. На основе многолетних (2004–2014 гг.) лабораторных определений физико-механических параметров грунтов методом пенетрации получены зависимости сцепления, угла внутреннего трения, сопротивления недренированному сдвигу и деформации от консистенции грунта естественного сложения и показателя текучести. Предлагается разделение консистенции грунта на 10 категорий. Приводятся таблицы и номограммы для определения показателей свойств грунтов в зависимости от консистенции грунта естественного сложения.

### Abstract

The article considers problems of strength and deformability of clay soils in the light of contact interactions on the basis of works by P.O. Boychenko, I.P. Ivanov, V.I. Osipov. Such their property of the first order as the consistency of soil of natural constitution is analyzed. A theory of natural soil strength based on contact interactions is proposed on the basis of the concept of «the critical point of soil condition» for the first time. An express method for determination of strength and deformation parameters of clay soils by the way of penetration by one effort using a cone of constant mass is offered. Dependences of the specific cohesion, internal friction angle, undrained shear strength and deformation on the natural constitution soil consistency and soil flow index were obtained on the basis of long-term (2004–2014) laboratory determinations of physical-mechanical parameters of soils by the penetration method. The author suggests to subdivide the soil consistency into 10 categories. Tables and nomograms for determination of soil parameters depending on the natural constitution soil consistency are presented.

*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 осмысляться 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. Соко-



лова [20, 21] (выделил типы микроструктур грунта), П.О. Бойченко [3] (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 [1, 2].

Исходным материалом для определенного обобщения послужили результаты многолетних лабораторных исследований свойств глинистых грунтов территории Санкт-Петербурга (около 10 000), проводившихся как в правовом поле общедеревальных нормативных документов (ГОСТ), так и по оригинальным методикам определения физико-механических свойств грунтов, разработанным отечественными учеными — П.О. Бойченко [3] и И.П. Ивановым [11].

### Консистенция грунта ненарушенного сложения

Ранее указывалось [8, 9], что *показатель консистенции грунта ненарушенной структуры* ( $C_B$ ) наряду с гранулометрическим составом, естественной (природной) влажностью ( $W_E$ ), плотностью грунта ( $\rho$ ), плотностью частиц грунта ( $\rho_s$ ) 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<sup>1</sup>. 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.

### 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/см<sup>2</sup> и угол внутреннего трения  $\varphi \approx 0^\circ$  (расчетный угол  $0^\circ$  — 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 [15]. Нынешняя градация основана на инструментальной лабораторной оценке расстояний между частицами мономинеральных монтмориллонитовых паст в дистиллированной воде (в типичной двухфазной системе). 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 грун-

<sup>1</sup> 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 вдавлению», «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 Е.А. Вознесенского ввести третью градацию для механических свойств грунтов, т.е. разделять их на прочностные, деформационные и динамические.

Таблица 1

Классификация грунтов по показателю консистенции при ненарушенном сложении (по [3])		
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

товые 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 связанные 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.

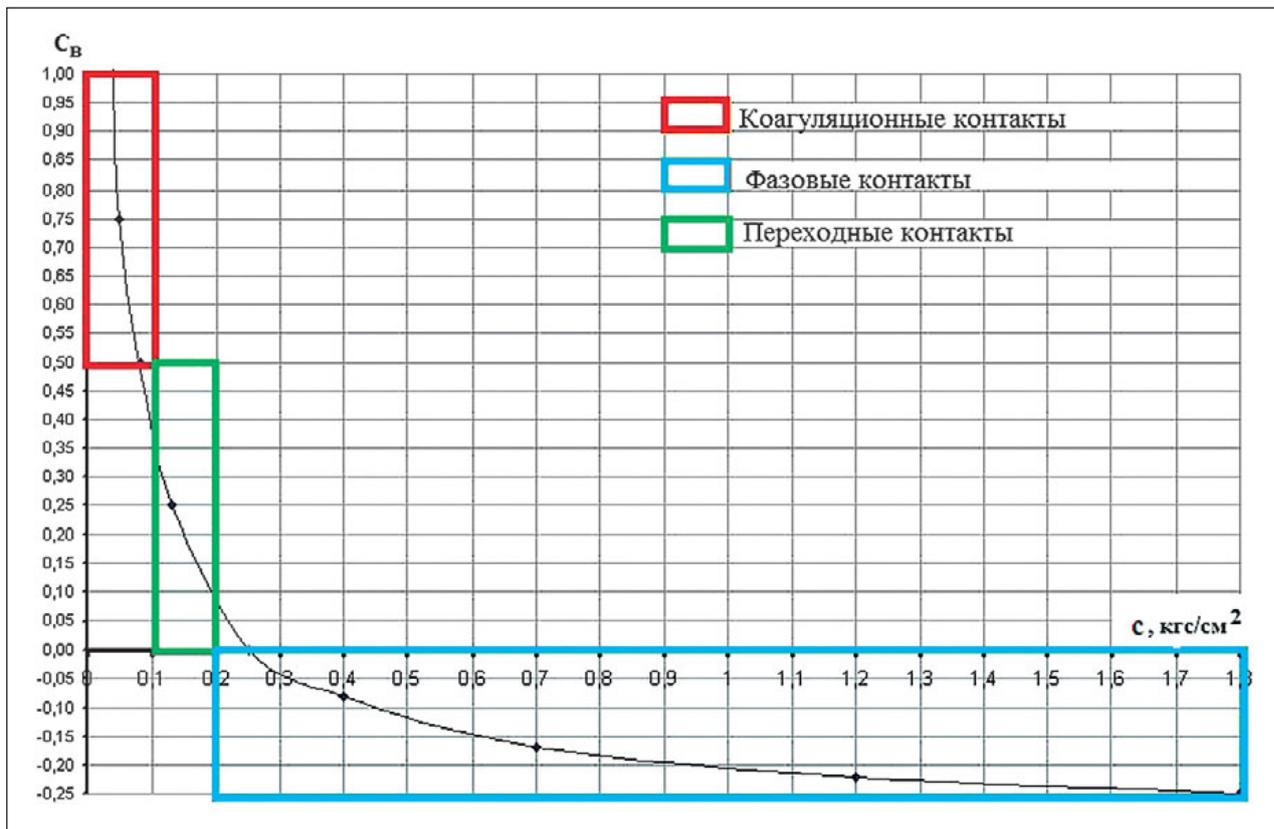


Рис. 1. Распределение типов контактов в зависимости от консистенции грунта по зависимости «показатель консистенции грунта естественного сложения  $C_B$  — удельное сцепление  $c$ »



Показатель консистенции  $C_B$  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/см<sup>2</sup> и  $\varphi \approx 0^\circ$ . Грунтовые пасты с определенными (на аппаратуре 1950-х гг.) значениями этих параметров ( $c = 0,019 \div 0,031$  кгс/см<sup>2</sup>;  $\varphi \approx 0^\circ$ ) повторно испытывались на пенетрометре с использованием падающего конуса постоянного веса с углом раскрытия  $30^\circ$  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  $30^\circ$  и массой 76 г) использует состояние грунта со сцеплением  $c = 0,035 \div 0,052$  кгс/см<sup>2</sup> [3]. 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 типов контактов в грунте можно все множество состояний глинистых грунтов в зависимости от показателя консистенции  $C_B$  разбить на три большие группы:

- $C_B > 1,0$  — грунты с коагуляционными контактами;
- $C_B = 1 \div 0$  — грунты с переходными контактами;
- $C_B < 0$  — 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).

Для оценки естественного состояния грунта вводит-ся показатель структурной прочности:

$$K_{cn} = C_B - I_L.$$

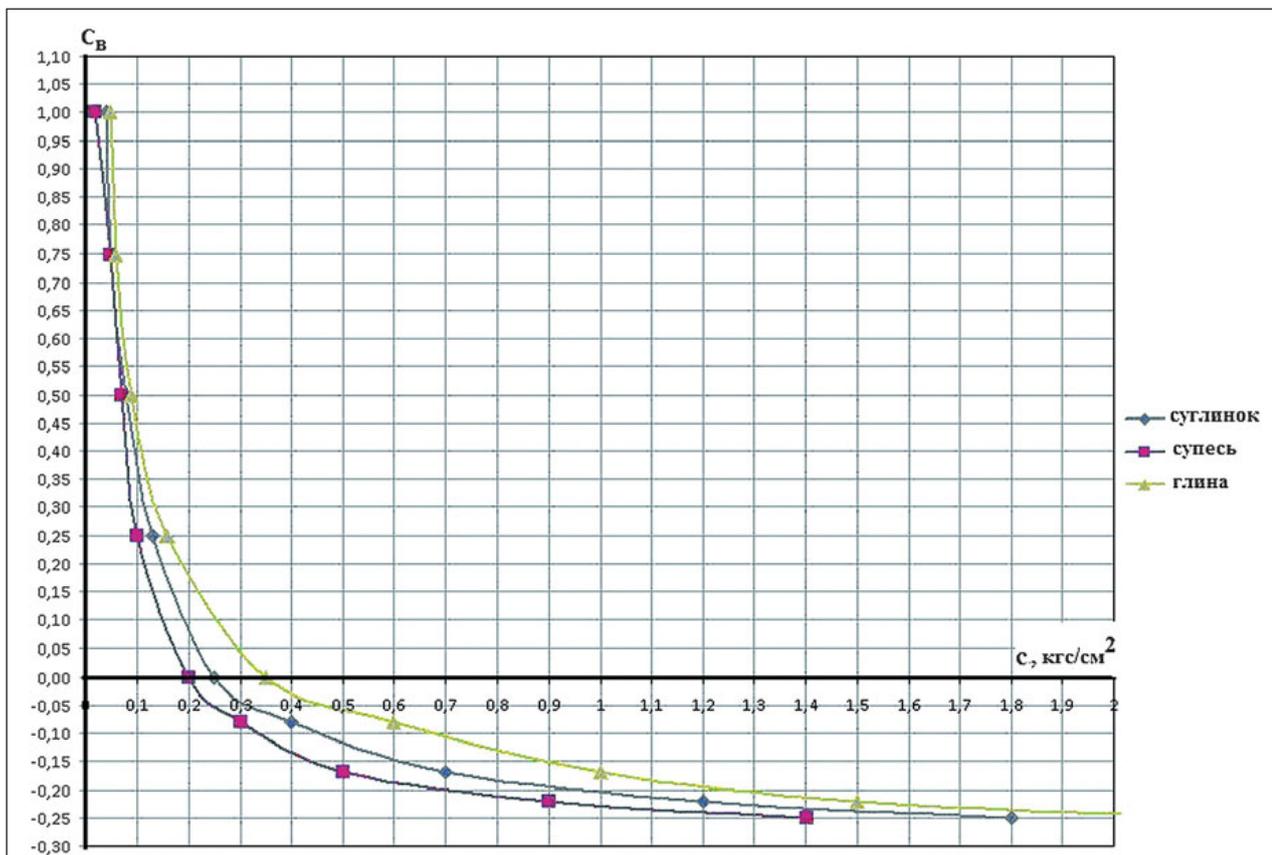


Рис. 2. Зависимости «показатель консистенции грунта естественного сложения  $C_B$  — удельное сцепление  $c$ » для трех разновидностей минеральных глинистых грунтов

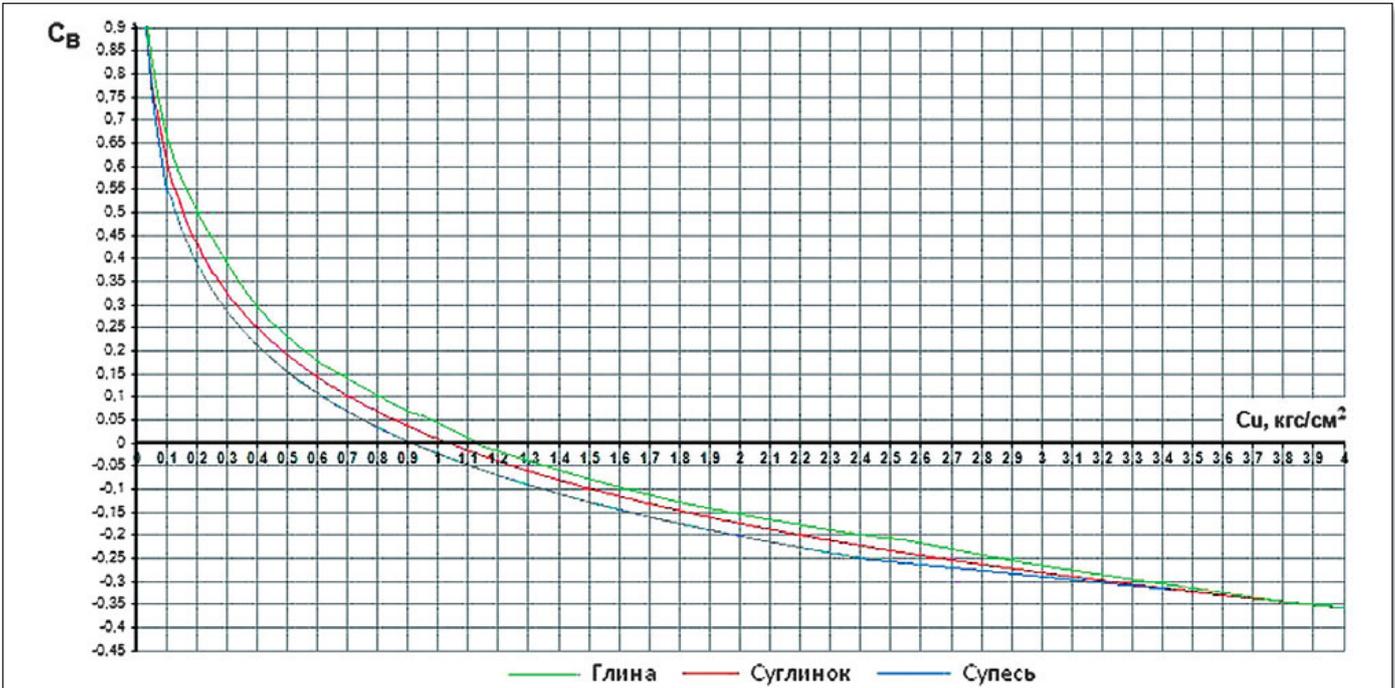


Рис. 3. Зависимости «показатель консистенции грунта естественного сложения  $C_B$  — недренированная прочность  $c_u$ » для трех разновидностей минеральных глинистых грунтов

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 $C_B$ (консистенция)	Вертикальная нагрузка $P$ , кгс/см <sup>2</sup>	Прочностные характеристики $\phi$ , град./с, кгс/см <sup>2</sup>			Модуль деформации в условиях естественной прочности $E$ , кгс/см <sup>2</sup>		Недренированная прочность $c_u$ , кгс/см <sup>2</sup>	
				супесь	суглинок	глина	суглинок	супесь	суглинок	супесь
> 1 (текучая)	> 22,5	> 1	-	-	-	-	-	-	-	-
	22,5÷16,2	0,75÷1,00 (текучепласт.)	0,125÷0,25÷0,50	5/0,02	4/0,04	2/0,05	<5	-	< 0,05	< 0,05
	16,2÷11,3	0,50÷0,75 (мягкопласт.)	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÷1,00 (текучепласт.)	11,3÷7,4	0,25÷0,50 (мягкопласт.)	0,25÷0,50÷0,75	10/0,07	8/0,08	6/0,09	10÷30	15÷40	0,16÷0,40	0,12÷0,35
0,50÷0,75 (мягкопласт.)				16/0,1	13/0,13	10/0,16				
0,25÷0,50 (тугопласт.)	7,4÷4	0÷0,25 (тугопласт.)	0,5÷1,0÷1,5	17/0,11	14/0,14	1/0,17	30÷80	40÷130	0,40÷1,00	0,35÷0,90
0÷0,25 (полутверд.)				25/0,20	20/0,25	15/0,35				
0÷0,25 (полутверд.)	4÷3	-0,25÷0 (полутверд.)	1,0÷1,5÷2,0	26/0,23	21/0,30	16/0,40	80÷120	130÷220	1,0÷1,5	0,9÷1,3
< 0 (твердая)	3,0÷1,7			30/0,30	25/0,45	18/0,60				
				31/0,40	26/0,50	19/0,70	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	2,0÷4,0÷6,0	34/0,80	28/1,00	24/1,50				
				34/0,90	29/1,20	25/1,50				
	< 1,2	< -0,25 (твердая)	2,0÷4,0÷6,0	-	-	-	> 250	-	> 2,7	> 2,4

По этому простому показателю грунты можно разделить на три группы:

- структурно устойчивые ( $K_{сн} > 0$ );
- структурно неустойчивые ( $K_{сн} \leq 0$ );
- структурно однородные ( $K_{сн} = 0$ ).

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

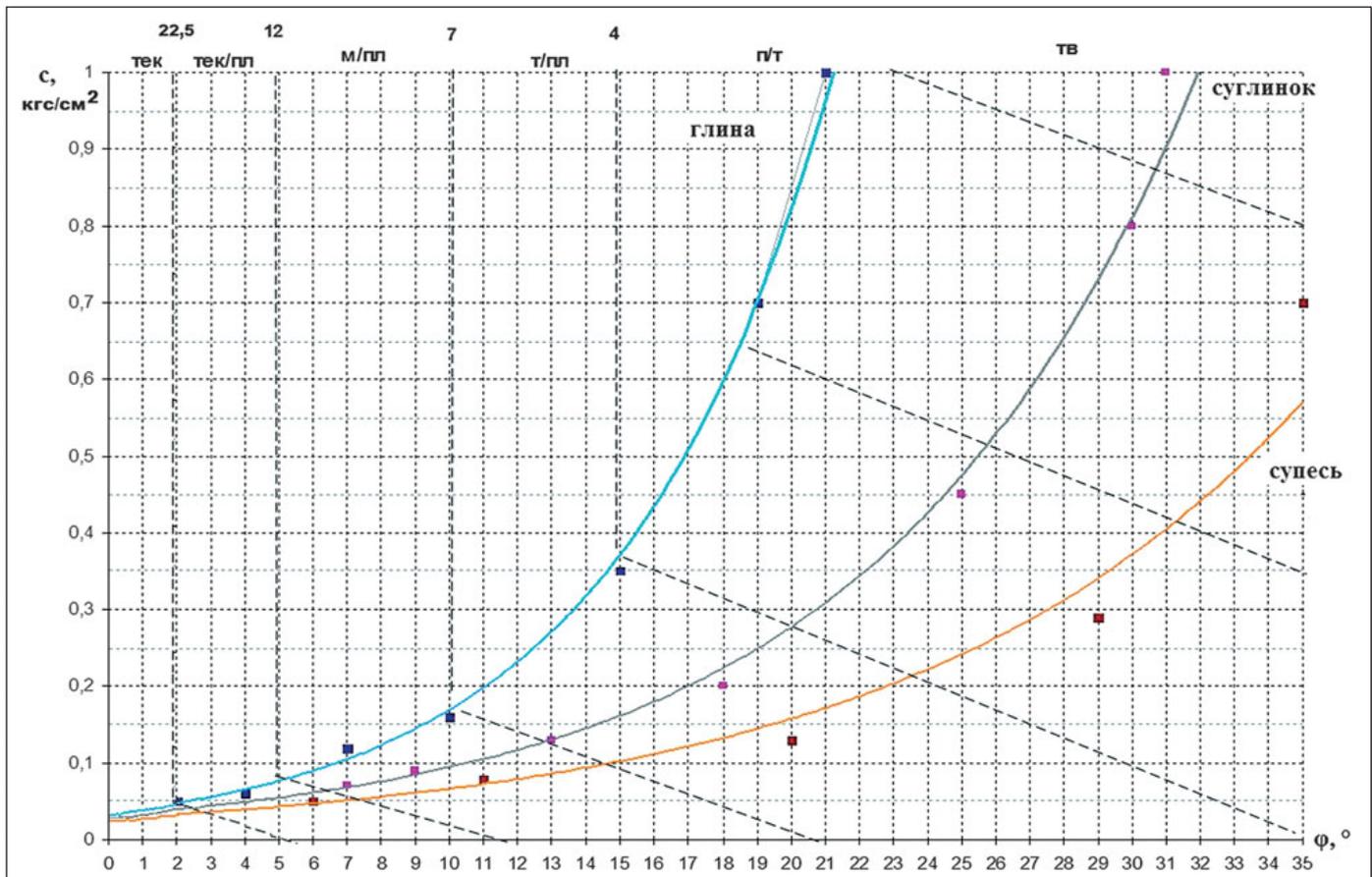
Итак, зная две «критические точки состояния грунтов» ( $W_e > W_L$  и  $W_e < W_p$ ), можно построить графики зависимости «показатель консистенции грунта естественного сложения — удельное сцепление» (рис. 1) и получить распределение типов контактов в зависимости от прочности для каждой разновидности 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 глинистых грунтов различен: у супеси удельное сцепление в этой точке составляет  $0,20 \text{ кгс/см}^2$ , у суглинков —  $0,25 \text{ кгс/см}^2$ . По результатам лабораторных определений построены только графики для су-

**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 / пластичные	-V
	-0,75÷-1,00	-		-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

глинков 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 исследова-



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

**Значения прочностных и деформационных характеристик разновидностей глинистых грунтов 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 <sup>2</sup>	Угол внутр. трения $\phi$ , град.	Недренир. прочность $c_u$ , кгс/см <sup>2</sup>	Модуль деформации $E$ , кгс/см <sup>2</sup>
Супесь	0,20	25	0,9	140
Суглинок	0,25	20	1,0	85
Глина	0,30	15	1,1	60

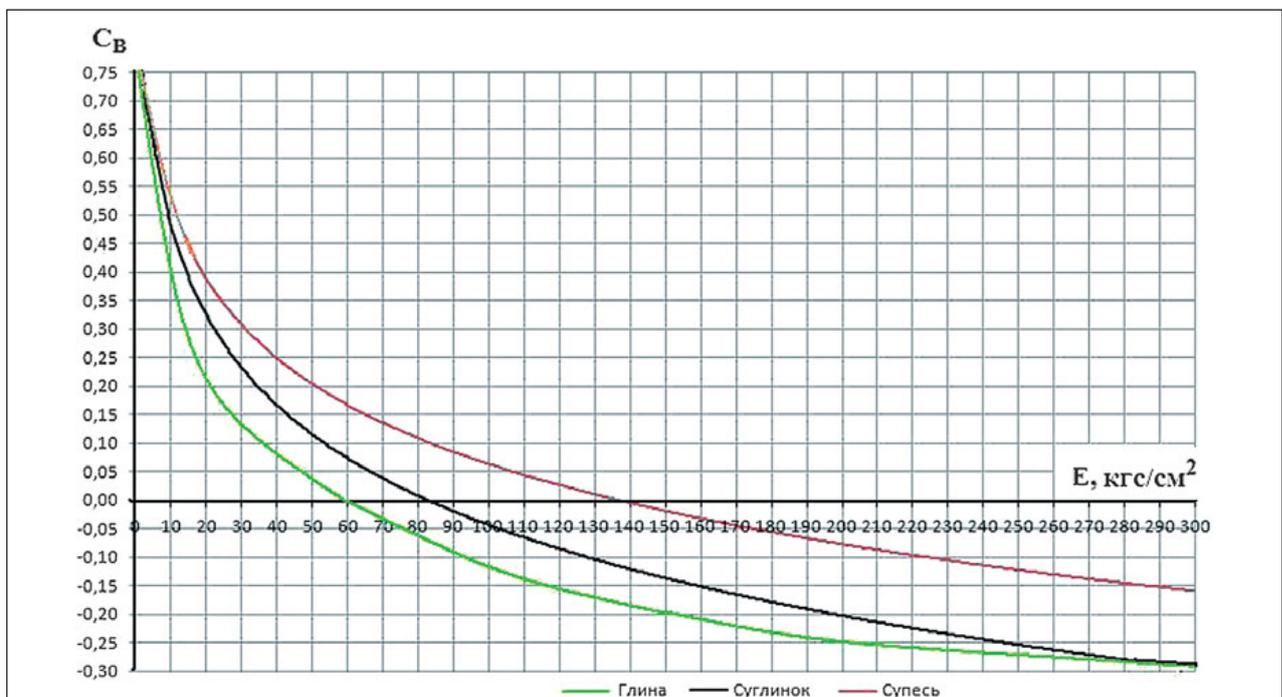
ниями. Пока, по всей видимости, стоит ожидать, что сцепление глин будет лежать в диапазоне 0,25–0,30 кгс/см<sup>2</sup>. Вполне вероятно, что данные значения соответствуют минимальной начальной прочности фазовых контактов в грунте.

### Прочностные свойства грунтов

В связи с вышеизложенным совершенно особое значение приобретает теория естественной прочности грунта [11]<sup>2</sup>. 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 интервале и не вызывать, с одной стороны, растягивающих напря-

жений, а с другой — доуплотнения грунта или появления порового давления. Нормальные давления должны находиться в диапазоне от сигма минимальной ( $\sigma_{min}$ ) до сигма максимальной ( $\sigma_{max}$ ). При нормальных давлениях менее  $\sigma_{min}$  возникают растягивающие напряжения, что занижает сопротивление сдвигу. При давлениях более  $\sigma_{max}$  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



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

<sup>2</sup> Работа И.П. Иванова «Определение показателей сопротивления сдвигу грунтов, характеризующих их естественную прочность» [11] — классическая «спящая статья». Опубликованная сорок лет назад (в 1975 г.) в Вестнике ЛГУ, она не привлекла поначалу особого внимания, хотя в действительности заложенный в ней научный потенциал просто не был должным образом оценен.



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  $C_B$  — недренажная прочность  $c_u$ » (рис. 3). На рисунке 4 представлены зависимости удельного сцепления  $c$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  от показателя консистенции  $C_B$ .

### **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 показателям 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.

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 плюс 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 (или невозможно) представить деформацию структуры грунта даже при нагрузке  $6 \text{ кгс/см}^2$ . В принятой методике проведения компрессионных испытаний существует некий начальный аппаратный порог, фиксирующий регистрацию начала изменения (уменьшения) высоты исходного образца грунта в одомере под воздействием вертикально прикладываемой нагрузки.

Фиксируемые деформации (0,01 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 неподвластен. Пористость (от макро- до ультрамикropор) 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 испытуемого 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 → ультрамикropоры» должна быть экспериментально доказана в жесткой привязке к состоянию грунта ( $W_e > W_i$ ;  $W_e < W_i$ ;  $W_e = W_i$ ;  $W_e = W_p$ ), 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 стабилometрах).

Именно в данном контексте (критического анализа определения механических свойств грунтов) необходимо рассматривать работу В.И. Осипова, Ф.С. Карпенко и Н.А. Румянцевой [14], 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  $\sigma_l$  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 бóльшей 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»<sup>3</sup>. 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.

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 ( $\phi$ ), 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.

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<sup>4</sup>.

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<sup>5</sup>.

4. Существующие схемы определения прочностных свойств грунтов — строительные и только строительные, что, впрочем, нисколько не умаляет их значения

<sup>3</sup> Графики зависимости модуля деформации от показателя консистенции грунта естественного сложения действительно чем-то напоминают силуэт скользящего по воде люггера (англ. lugger — трехмачтовое судно с рейковым парусным вооружением). Выражение «паруса деформаций» употребляется, например, в среде петербургских грунтоведов.

<sup>4</sup> А 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 с контактными взаимодействиями 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 исследованиям механических свойств грунтов (использовании принципа «двух схем») понятие «геотехнический мониторинг» приобретет наконец конкретный смысл, одной из задач которого является достоверное прогнозирование динамики изменений показателей физико-механических свойств грунтов до, во время и после строительства того или иного инженерного сооружения.

<sup>5</sup> По согласованию с геолого-геодезической службой Комитета по градостроительству и архитектуре Администрации Санкт-Петербурга, а также аналогичной структурой Ленинградской области, 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  $\phi$ , недренированной прочности  $c_u$  и модуля деформации  $E$  от сопротивления грунта сжатию  $R$  и показателя консистенции при естественном сложении  $C_B$ . Значения  $c$ ,  $\phi$ ,  $c_u$  и  $E$ , определенные на основании пенетрационных испытаний, полностью сопоставимы с результатами, полученными другими методами (в срезных, компрессионных приборах и стабиллометрах) с доверительной вероятностью 0,95.



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 микроструктуры и тип структурных связей в нем.

6. В практическом плане (при инженерных изысканиях для строительства) выявленные зависимости ( $c$ ,  $\varphi$ ,  $c_u$  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, дополненная информацией о контактных взаимодействиях (естественной прочности контактных взаимодействий), 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 статьи. Работа выполнена в Центре генетического грунтоведения «Охотинского общества грунтоведов».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов Е.Н. О механических свойствах глинистых грунтов // Грунтоведение. 2012. № 1. С. 62–70.
2. Богданов Е.Н., Иванов И.П., Руднева И.Е. Применение пенетрации при сдвиговых испытаниях грунтов естественной прочности / Современные методы определения механических характеристик слабых грунтов. Л.: ЛДНТП, 1979. С. 52–56.
3. Бойченко П.О. Определение пределов пластичности и консистенции глинистых грунтов методом конуса. Л.: Изд-во ЛГУ, 1964. 47 с.
4. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2010. 78 с.
5. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013. 38 с.
6. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы определения физических характеристик. М.: Изд-во стандартов, 1985. 24 с.
7. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1987. 398 с.
8. Здобин Д.Ю. О консистенции грунтов естественного сложения / Материалы 17-х Сергеевских чтений. М., 2015. С. 554–561.
9. Здобин Д.Ю., Семенова Л.К. Показатель текучести и консистенция – основные физико-химические показатели состояния грунтов // Инженерные изыскания. 2013. № 5. С. 28–33.
10. Иваникова Н.П. Методы исследования механических свойств грунтов. СПб.: Изд-во 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., Габиров Ф.Г. Методы исследования свойств глинистых грунтов. Баку: Адильоглы, 2004. 185 с.
13. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Грунтоведение. 2013. № 2. С. 3–35.
14. 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.
15. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
16. Охотин В.В. Грунтоведение. СПб.: ЦГГ, 2008. 231 с.
17. Разоренов В.Ф. Пенетрационные испытания грунтов. М.: Стройиздат, 1968. 182 с.
18. Ребиндер П.А., Семенов Н.А. О методе погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств пластично-вязких тел // Доклады АН СССР. 1949. Т. 64. № 6. С. 835–838.
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. М.: Госстройиздат, 1958. 608 с.
23. CEN ISO/TS 17892-6. Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 6. Fall cone test. CEN, 2004.
24. D3441-98. Standard test method for deep, quasi-static, cone and friction-cone penetration tests. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 1998.
25. D5778-95. Standard test method for performing electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2000.
26. NF P94-052-1:1995. Soils: reconnaissance et essais – détermination des limites d'Atterberg. Partie 1. Limite de liquidité. Méthode du cône de pénétration. AFNOR, 1995.
27. SS 02 7125:1991. Geotechnical test methods. Undrained shear strength. Fall cone test cohesive soil. Sweden, 1991.