ЕСТЕСТВЕННАЯ ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ. ЧАСТЬ 2

THE NATURAL STRENGTH AND DEFORMABILITY OF CLAY SOILS. PART 2

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
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

Ключевые слова:
глинистые грунты; типы контактов между частицами грунта; физико-механические свойства грунтов; показатель консистенции грунта естественного сложения; удельное сцепление; угол внутреннего трения; ступенчатая пенетрация; взаимосвязь параметров.

Key words:
clay soils; types of contacts between soil particles; physical-mechanical properties of soils; consistency index of soil of natural structure; specific cohesion; angle of internal friction; step penetration; relationship between parameters.

Аннотация

Рассматриваются вопросы определения прочностных свойств глинистых грунтов с позиций теории естественной прочности контактных взаимодействий (ЕПКВ) Анализируется свойство первого порядка — консистенция грунта естественного сложения. Утверждается, что данная характеристика — частный случай такого фундаментального показателя свойств грунта, как удельное сопротивление пенетрации. На основе результатов лабораторных определений физико-механических свойств грунтов методом ступенчатой пенетрации получены зависимости значений удельного сцепления и угла внутреннего трения от консистенции грунта естественного сложения и показателя текучести. Приводятся номограммы и сводная таблица для определения показателей прочностных свойств глинистых грунтов (супесей, суглинков, глин) в зависимости от удельного сопротивления пенетрации. Предлагается использование лабораторной пенетрации в инженерных изысканиях для строительства как одного из наиболее простых и объективных методов исследования грунтов.

Abstract

Determination of strength properties of clay soils from the standpoint of the theory of natural strength of contact interactions (NSCI) is considered. Such property of the first order as the consistency of soil of natural structure is analyzed. The author argues that this characteristic is a particular case of such fundamental indicator of soil properties as the specific penetration resistance. Dependences of the specific cohesion and internal friction angle on the consistency of soil of natural structure and its flow index on the basis of laboratory determinations of physical-mechanical soil properties by the step penetration method were obtained. Charts and the corresponding summary table for determination of the strength parameters of clay soils (sandy loams, clay loams, clays) depending on the specific penetration resistance are presented. The author proposes to use the laboratory penetration method for engineering surveys for construction as one of the most objective and simple soil investigation methods.

Введение

В первой части статьи [11] были подробно обсуждены вопросы использования определения прочностных и деформационных свойств глинистых грунтов методом пенетрации одним усилием — конусом постоянной массы. Кроме того, был сделан вывод, что ***для каждого типа контактов*** в глинистом грунте необходимо применять ***свой метод лабораторного определения механических свойств*** (для первой группы — крыльчатый зонд, для второй — одноплоскостной срез, для третьей — одноосное раздавливание[1]).

Существующий парадокс, тем не менее, вполне разрешим, если использовать для определения прочностных и деформационных свойств грунтов единый метод, применимый для всех типов, видов и разновидностей грунтов вне зависимости от их природного (исходного) состояния — ***метод ступенчатой пенетрации***.

В настоящее время в нормативных документах, регламентирующих проведение инженерных изысканий для строительства, в частности в одном из основных — ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация» [8], термин «пенетрация» не встречается вовсе. Например, текст приложения А.22 звучит так: «Сопротивление недренированному сдвигу c_u, кПа, — прочность глинистых грунтов, определяемая по результатам недренированных лабораторных или полевых испытаний (трехосные испытания, вращательный срез ***и др.***)[2]» [8]. Оче-

[1] В самом деле, сложившаяся ситуация как минимум вызывает серьезные вопросы (как если бы для определения естественной влажности грунтов в зависимости от их природного состояния применялись различные методы определения).

[2] Хотя в первой редакции приложение А.22 выглядело по-другому: «Сопротивление недренированному сдвигу c_u, кПа, — величина, определяемая по результатам недренированных лабораторных или полевых испытаний глинистых грунтов (трехосные испытания, *пенетрация*, вращательный срез, зондирование и др.)». Из текста документа, однако, совершенно не понятно было, о какой пенетрации шла речь — о полевой или о лабораторной.

видно, это понятие было завуалировано сокращением ***«др.»*** в определении сопротивления недренированному сдвигу. Мотивы редактуры этого приложения не совсем понятны — ведь совершенно очевидно, что параметр c_u может (и должен) определяться в том числе методом лабораторной пенетрации.

Тем не менее безотносительно к наличию или отсутствию данного метода определения показателей свойств грунтов в современном корпусе нормативных документов, регламентирующих проведение лабораторных испытаний грунтов, удельное сопротивление пенетрации ***R*** — важнейшая объективная прочностная характеристика грунта. Зная ***R***, можно определить величину сцепления грунта ***c***, угол внутреннего трения **φ**, сопротивление недренированному сдвигу c_u.

В целом, удельное сопротивление пенетрации — это интегральная величина, характеризующая гранулометрический состав грунтов, их влажность, плотность, степень сложения — все то, чем в современном теоретическом грунтоведении оперируют теория контактных взаимодействий в грунте (так называемая физико-химическая механика природных дисперсных сред) и так называемая теория эффективных напряжений в грунте.

Кроме того, пенетрационные испытания грунтов (конусом или крыльчатым зондом) дают возможность определения механических свойств текучих и текучепластичных глинистых грунтов без нарушения их исходного состояния.

Важнейшим моментом в обсуждаемой проблематике является то, что консистенция грунта естественного сложения (C_B[3]) — частный случай (для текучих и пластичных разновидностей глинистого грунта) более общего, фундаментального, понятия (свойства) — удельного сопротивления пенетрации (***R***). Если в первом случае определение C_B происходит без приложения внешнего дополнительного усилия, то во втором — при возрастающей дополнительной (ступенчатой) нагрузке после стабилизации осадки конуса, возникшей на предыдущей ступени.

История изучения свойства «сопротивление грунта вдавливанию конуса»

Первые отечественные пенетрационные испытания грунтов относятся к 20–30-м годам XX века, когда в практику лабораторных исследований грунтов было введено определение верхнего предела пластичности (границы текучести) с помощью балансировочного конуса Васильева (угол 30°, вес 76 г). Конус А.М. Васильева впервые появился в 1936 г. в «полевой сумке военного грунтоведа»[4] [5]. Тогда же рассматриваемый метод вошел в нормативные документы (ОСТ 90004-38 и У-24-41 Наркомстроя[5]).

В основе метода лежит основная идея пенетрации, применяемая по настоящее время, — проникновение конуса с определенным углом раскрытия в грунт до определенной глубины (в данном случае 10 мм).

Отметим, что основоположник изучения физико-механических свойств грунтов как объектов геологической природы В.В. Охотин как в статьях, так и в первом в мире учебнике по грунтоведению совершенно четко различал понятия ***«сопротивление грунтов вдавливанию»*** и ***«сопротивление грунтов сжатию»***, подразумевая под первым именно результаты пенетрационных испытаний [21].

Большой вклад в теорию и практику пенетрационных испытаний грунтов внес П.О. Бойченко [3, 4]. В 1964 г. в его монографии «Определение пределов пластичности и консистенции глинистых грунтов методом конуса» (вышедшей посмертно) была изложена теоретическая база пенетрационных испытаний грунтов конусом постоянного веса (300 г) с углом раскрытия 30°.

В последующее время существенный вклад в теорию лабораторной пенетрации грунтов внесли В.Ф. Разоренов [22], Е.Н. Богданов [1, 2], Н.П. Иваникова [14, 15] и другие исследователи. В результате выполненных ими работ были выявлены основные зависимости глубины проникновения конуса в грунт от гранулометрического состава и основных физико-химических свойств (влажности, плотности, консистенции) грунтов различных видов и разновидностей. Эти зависимости были получены для конусов различного веса и различных углов раскрытия (30, 45, 60, 90°), а также для шарикового штампа определенного диаметра.

Ступенчатая пенетрация грунтов

В настоящее время различают следующие два вида лабораторных пенетрационных испытаний.

1. *Так называемая пенетрация одним усилием — конусом постоянной массы* (как правило, конусом Бойченко с массой 300 г и углом раскрытия 30°) со свободным внедрением конуса в образец грунта [11].

2. *Ступенчатая пенетрация*. После свободного внедрения конуса в образец грунта происходит дальнейшее вдавливание конуса в грунт путем приложения ступенчато возрастающей нагрузки. Ступени нагрузки на конус выбирают в зависимости от консистенции испытываемого грунта. Каждую ступень нагрузки выдерживают до условной стабилизации деформации, составляющей не более 0,1 мм за 30 с. Каждое испытание включает 6–9 ступеней нагрузки. Общая глубина погружения конуса должна достигать 15–20 мм. Вес конуса и угол его раскрытия могут быть различными.

Теория проникновения конуса в пластичную среду в общем виде подчиняется простой зависимости:

$$R = P/h^2, \qquad (1)$$

где R — удельное сопротивление пенетрации; P — вертикальное усилие, передаваемое на внедряемый конус; h — глубина проникновения конуса в грунт.

[3] C_B — сокр. от «cone Boychenko» — «конус Бойченко».

[4] «Полевая сумка военного грунтоведа» — простой, продуманный, компактный и удобный набор инструментов для оперативного принятия решений непосредственно в экспедиционных условиях. К сожалению, это еще один совершенно забытый эпизод отечественной истории инженерной геологии. Со временем «сумка военного грунтоведа» трансформировалась в полевую лабораторию Литвинова (ПЛ-2) — незаменимый инструмент изыскателей старшего поколения.

[5] Автору пока не удалось обнаружить первоисточники этих документов.

Таблица 1

«Чувствительность» глинистых грунтов к проникновению конуса по удельному сопротивлению пенетрации (по табл. 8 СНиП П-15-74)	
«Чувствительность» грунтов к пенетрации	**Сопротивление пенетрации $P_п$, МПа**
Очень прочные	≥ 0,20
Прочные	0,10÷0,20
Средней прочности	0,05÷0,10
Слабые	< 0,05

Для дисперсных несвязных грунтов — песков — эта зависимость, вероятнее всего, будет иметь вид:

$$R = P/h^3. \quad (2)$$

В настоящее время общепринятого стандарта и утвержденной методики определения удельного сопротивления пенетрации не существует. В 1976 году ПО «Стройизыскания» Госстроя РСФСР выпустило ныне основательно забытое руководство ВНМД 26-76 [6], в котором методу пенетрации посвящено полстраницы (пп. 6.104-6.108) и приведена таблица «чувствительности грунта», определяемой соотношением $P_{п(ненаруш.)} / P_{п(наруш.)}$ (где $P_{п(ненаруш.)}$, $P_{п(наруш.)}$ — сопротивление пенетрации грунта ненарушенного и нарушенного сложения соответственно). Подобная таблица присутствует и в СНиП П-15-74 (табл. 1)[6].

Единственным нормативно-техническим документом, в котором достаточно подробно описана методика лабораторного определения указанного показателя, является РСН 51-84, где она приведена в приложении 9 [24]. Интересно отметить, что таблица, аналогичная упомянутой выше, фигурирует и в этом документе, но уже под названием «Классификация пылевато-глинистых грунтов по удельному сопротивлению пенетрации».

Методика лабораторного определения удельного сопротивления пенетрации $P_п$ пылевато-глинистых грунтов (кроме содержащих крупнообломочные включения размером более 2 мм в количестве более 10% по массе) такова. Кольцо с образцом помещают на столик пенетрометра, подводят острие конуса к поверхности грунта, закрепляют подвижную часть пенетрометра, индикатор устанавливают на нулевую отметку. Убрав защелку пенетрометра, позволяют конусу свободно внедряться в образец в течение 30–60 с, отмечая его погружение по индикатору. Дальнейшее вдавливание конуса происходит под действием возрастающей ступенями нагрузки. Величину ступеней нагрузки на конус выбирают в зависимости от консистенции испытываемого грунта по показателю текучести:

консистенция грунта	**ступень нагрузки P, кгс**
текучая	0,05
текучепластичная	0,15
мягкопластичная	0,30
тугопластичная	0,50
полутвердая	0,75
твердая	1,00

Каждую ступень нагрузки выдерживают до условной стабилизации деформации, составляющей не более 0,1 мм за 30 с. При каждом испытании прикладывают 6–9 ступеней нагрузки. Общая глубина погружения конуса должна достигать 15–20 мм. Далее по данным каждого опыта строят график зависимости квадрата глубины погружения конуса h^2 от передаваемого на конус вертикального усилия P, на котором точки должны располагаться на прямой, выходящей из начала координат.

По удельному сопротивлению пенетрации $P_п$ пылевато-глинистые грунты классифицируются следующим образом:

грунты	**$P_п$, кгс/см²**
очень прочные	> 2,0
прочные	1,0÷2,0
средней прочности	0,5÷1,0
слабые	< 0,5

Из недостатков описанной методики следует отметить следующее.

1. Не стандартизированы технические параметры конуса (его масса варьирует от 150 до 300 г).

2. Область распространения методики указана как «пылевато-глинистые грунты». Как уже упоминалось, в глинистых грунтах $R = P/h^2$. В песчаных грунтах $R = P/h^3$. Если добавить в методику данную формулу с соответствующим обоснованием и полученными зависимостями для песков различной крупности, то это существенно расширит область ее применения.

3. Абсолютно нецелесообразно проводить ступенчатую пенетрацию для текучих и текучепластичных разностей, т.к. глубина проникновения конуса в эти грунты, как правило, сразу составляет более 10 мм.

4. Нормированная глубина проникновения конуса в грунт 15–20 мм кажется излишней (особенно для полутвердых и твердых грунтов). Представляется обоснованным проведение ступенчатой пенетрации для остальных градаций грунта по показателю текучести (от мягкопластичной до твердой консистенции) до постоянной глубины погружения конуса в грунт 10 мм.

5. Неудачно обозначение удельного сопротивления пенетрации $P_п$. В других отечественных и зарубежных методиках по данному вопросу существует консенсус и данный показатель обозначается буквой R (далее в статье будем обозначать данный показатель буквой R).

Таким образом, представляется обоснованным и целесообразным выработать единый подход для всего комплекса лабораторных работ, связанных с пенетрацией, а именно: объединить в одном методе преиму-

[6] Эволюция и трансформация существующих методов определения свойств грунтов, внедрение новых и существенная корректировка используемых методик (а вместе с этим актуализация и пересмотр ГОСТ) в области изучения свойств грунтов — тема для совершенно отдельного исследования. Стандарты — это своеобразные временные индикаторы состояния теоретического и практического потенциала государства, его технологической и производственной базы в той или иной сфере промышленности. ГОСТ — не просто инструкция, а своего рода документ, юридически фиксирующий уровень технической культуры общества.

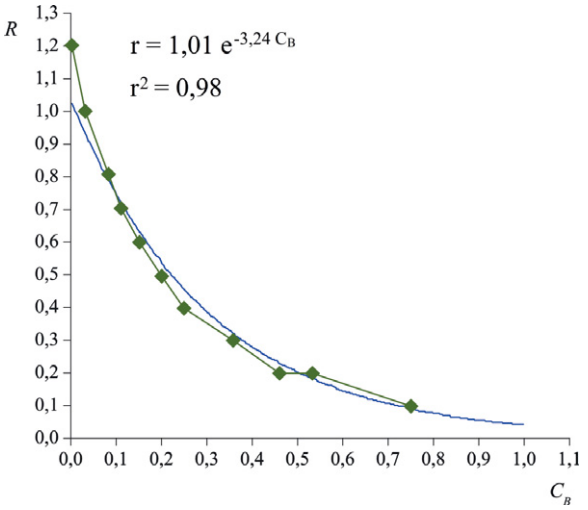

Рис. 1. Типичный график зависимости «консистенция грунта естественного сложения (C_B, усл.ед.) — удельное сопротивление пенетрации (R, кгс/см^2)» для минеральных глинистых грунтов с коагуляционными и переходными контактами (r — коэффициент корреляции; r^2 — коэффициент детерминации)

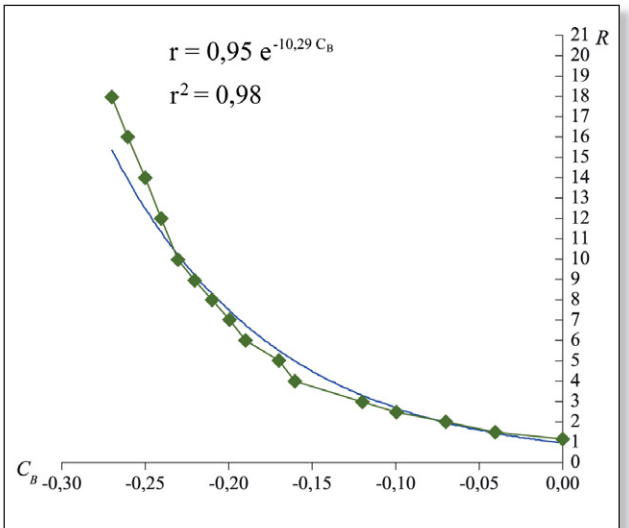

Рис. 2. График зависимости «консистенция грунта естественного сложения (C_B, усл.ед.) — удельное сопротивление пенетрации (R, кгс/см^2)» для минеральных глинистых грунтов с переходными цементационными контактами (r — коэффициент корреляции; r^2 — коэффициент детерминации)

щества как пенетрации одним усилием (конусом постоянной массы), так и ступенчатой пенетрации. И в первом, и во втором случае речь идет о разрушении природного микростроения грунта с присущим только ему конкретным типом контактов между частицами и определением естественных (природных) величин его сцепления и угла внутреннего трения.

Итак, для текучих и текучепластичных пылевато-глинистых грунтов целесообразно производить определение удельного сопротивления пенетрации только одним усилием (конусом постоянной массы), а для пылевато-глинистых грунтов от мягкопластичной до твердой консистенции — сначала только одним усилием (конусом постоянной массы), а по достижении предельной глубины свободного проникновения конуса в грунт — путем ступенчатой пенетрации.

И, без всякого сомнения, в качестве объективного показателя первого порядка следует ввести, наконец, в практику лабораторных определений ***показатель консистенции грунта естественного (ненарушенного) сложения*** для всех состояний пылевато-глинистых грунтов.

Анализируя международные нормативно-технических документы соответствующей тематики (как для полевых, так и для лабораторных испытаний грунтов), необходимо отметить, что они достаточно широко внедрены в практику инженерных (геотехнических) изысканий как в Европе [29, 30, 31], так и в Северной Америке [27, 28].

При анализе вышеупомянутых документов можно сделать следующие выводы:

- лабораторная пенетрация грунтов активно используется в зарубежной практике инженерных изысканий;
- лабораторная пенетрация грунтов находится в сфере нормирования;
- методики определения удельного сопротивления пенетрации R в целом аналогичны отечественным разработкам в данной области;
- определяемые показатели аналогичны отечественным P_n и C_B.

Проанализировав большое (более 10 тыс.) количество определений удельного сопротивления пенетрации для грунтов Санкт-Петербурга, удалось обобщить полученные данные в виде зависимости удельного сопротивления пенетрации R от консистенции грунтов естественного сложения C_B. Подчеркнем, что данные графики строились с безусловным учетом типа контактов в грунте [14].

Для глинистых грунтов с коагуляционными (текучих) и переходными (от теукепластичных до твердых) контактами величина R определялась по глубине проникновения в грунт конуса Бойченко (при пенетрации одним усилием). График полученной зависимости показан на рис. 1.

Для глинистых грунтов с фазовыми и цементационными контактами (полускальных и скальных) удельное сопротивление пенетрации определялось ступенчатой нагрузкой до полного разрушения образца. График зависимости представлен на рис. 2.

И, наконец, совместив обе кривые, получим обобщенный график зависимости удельного сопротивления

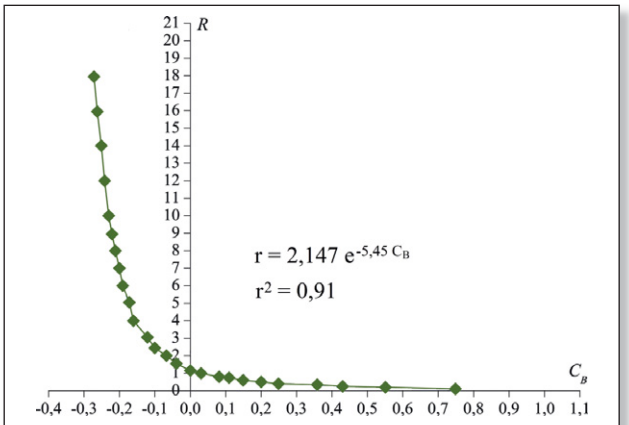

Рис. 3. Обобщенный график зависимости «консистенция грунта естественного сложения (C_B, усл.ед.) — удельное сопротивление пенетрации (R, кгс/см^2)» для минеральных глинистых грунтов (r — коэффициент корреляции; r^2 — коэффициент детерминации)

пенетрации от консистенции минеральных глинистых грунтов естественного сложения (рис. 3).

Необходимо отметить, что все три графика имеют очень высокие доверительные вероятности (коэффициенты детерминации r^2 варьируют от 0,91 до 0,98), что говорит об устойчивой корреляционной связи между C_B и R.

Важный момент, который необходимо отметить в контексте обсуждения данной методики, заключается в том, что со всех точек зрения определение прочностных свойств грунтов с цементационными структурными связями (полускальных) уместнее проводить методом одноосного сжатия (с определением предела прочности $R_{сж}$). Причина этого очевидна: площадь поперечного сечения испытываемого образца (с минимальными размерами 40×80 мм) значительно больше разрушаемого единичного контакта между грунтовыми элементами, вследствие чего получаемая величина предела прочности гораздо представительнее.

Результаты исследований можно представить в виде сводной таблицы 2 для супесей, суглинков и глин.

Большое (а порой и единственно объективное) значение и неоспоримое преимущество метода пенетрации — это возможность объективного контроля полученного кернового материала. Определенные по единой методике исходные параметры грунта (в полевых условиях и в стационарной грунтовой лаборатории) позволят оценить, во-первых, структурные изменения (если таковые имеются), заключенные в самой природе грунта (тиксотропию, разуплотнение, линейную и объемную усадку и т.д.), а во-вторых, полностью снимут полемику вокруг вопросов транспортировки образцов в стационарную грунтовую лабораторию. И разница в значениях глубины погружения конуса в грунт сразу после его отбора и после вскрытия монолита в лаборатории выведет дискуссию на совершенно другой уровень: либо это изменение связано с самой природой грунта, о чем было сказано выше, либо это прямое нарушение правил отбора, упаковки и транспортировки образца.

Таблица 2

Показатели прочностных свойств* глинистых грунтов с учетом зависимости их консистенции при естественном сложении от удельного сопротивления пенетрации

Глубина погружения конуса *h*, мм	Удельное сопротивление пенетрации *R*, кгс/см²	Вертикальные нагрузки *P*, кгс/см²	Супесь		Суглинок		Глина	
			φ, град.	*c*, кгс/см²	φ, град.	*c*, кгс/см²	φ, град.	*c*, кгс/см²
22		0,125-0,25-0,5	5	0,02	4	0,04	2	0,05
16	0,1	0,125-0,25-0,5	6	0,05	5	0,05	4	0,06
12	0,2	0,125-0,25-0,5	9	0,05	7	0,07	5	0,08
10	0,2	0,25-0,5-0,75	10	0,08	9	0,09	6	0,10
9	0,3	0,25-0,5-0,75	13	0,09	10	0,10	7	0,12
7	0,4	0,25-0,5-0,75-1	16	0,10	13	0,13	10	0,16
6,5	0,5	0,5-1-1,5	18	0,12	15	0,15	11	0,18
6	0,6	0,5-1-1,5	20	0,13	16	0,17	12	0,20
5,5	0,7	0,5-1-1,5	21	0,15	17	0,18	13	0,23
5	0,8	0,5-1-1,5	22	0,16	18	0,20	13	0,26
4,5	1	0,5-1-1,5	23	0,19	19	0,22	14	0,30
4	1,2	0,5-1-1,5	25	0,20	20	0,25	15	0,35
3,5	1,5	0,5-1-1,5	26	0,23	21	0,30	16	0,40
3,2	2	1-1,5-2	29	0,28	24	0,38	17	0,50
3	2,5	1-1,5-2	30	0,30	25	0,45	18	0,60
2,5	3	1-2-3	31	0,40	26	0,50	19	0,70
2,2	4	1-2-3	32	0,50	27	0,60	20	0,85
2	5	1-2-3	32	0,50	27	0,80	21	1,00
1,8	6	2-3-4	33	0,60	28	0,80	22	1,20
1,7	7	2-3-4	33	0,70	28	0,90	23	1,40
1,6	8	2-3-4	34	0,80	29	1,00	24	1,50
1,5	9	2-3-4-5	34	0,90	29	1,20	25	1,50
1,4	10	2-4-6	35	1,00	30	1,30	25	1,60
1,3	12	2-4-6	-	1,20	-	1,60	-	1,80
1,2	14	3-5-7	-	1,40	-	1,80	-	2,00
1,1	16	3-5-7	-	1,60	-	2,10	-	2,10
1	18	4-6-8	-	1,80		2,30	-	2,30
1	20	4-6-8	-	2,00	-	2,60	-	2,60

* *c* — удельное сцепление; φ — угол внутреннего трения.

Выводы

Вследствие включения таких показателей, как *консистенция грунта естественного сложения* (C_B) и его *удельное сопротивление пенетрации* (R), в правовое поле общефедеральных стандартов произойдут следующие важнейшие и актуальнейшие изменения.

1. Станут возможными определение консистенции грунта в *естественном сложении* как объективного показателя природного состояния грунта и его смысловое разделение с расчетным показателем текучести грунта в нарушенном сложении.

2. Можно будет производить определение удельного сопротивления пенетрации с последующим расчетом удельного сцепления грунта (c), угла внутреннего трения (φ), сопротивления недренированному сдвигу (c_u) с помощью еще одного метода лабораторного определения прочностных и деформационных характеристик — лабораторной пенетрации грунта, в том числе и для внутрилабораторного контроля определения этих показателей другими лабораторными методами, отраженными в нормативной базе [7].

3. Будет обеспечено усиление контроля отбора, транспортировки и сохранности образцов грунта, доставляемых в стационарную грунтовую испытательную лабораторию.

4. В перспективе станут возможными определение плотности сложения естественных песчаных грунтов и расширение применения рассмотренного метода при строительстве (для контроля качества трамбовки дна котлованов, экспресс-контроля уплотнения полотна дорожной одежды и т.д.).

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. *Бойченко П.О.* Определение пределов пластичности, консистенции и коэффициента структурной прочности связных грунтов методом конуса. Л.: Изд-во ЛГУ, 1950. С. 5–32.
5. *Васильев А.М.* Лабораторные исследования физических и водных свойств грунтов. М.: Госгеолиздат, 1941. 89 с.
6. ВНМД 26-76. Руководство по лабораторным исследованиям физико-механических свойств грунтов при производстве инженерных изысканий для строительства. М.: Госстрой РСФСР, Стройизыскания, 1976.
7. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2013. 78 с.
8. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013. 38 с.
9. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы определения физических характеристик. М.: Издательство стандартов, 1985. 24 с.
10. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М.* Поверхностные силы. М.: Наука, 1987. 398 с.
11. *Здобин Д.Ю.* Естественная прочность и деформируемость глинистых грунтов. Часть 1 // Инженерные изыскания. 2015. № 7. С. 30–38.
12. *Здобин Д.Ю.* О консистенции грунтов естественного сложения / 17-е Сергеевские чтения. М., 2015. С. 554–561.
13. *Здобин Д.Ю., Семенова Л.К.* Показатель текучести и консистенция — основные физико-химические показатели состояния грунтов // Инженерные изыскания. 2013. № 5. С. 28–33.
14. *Иваникова Н.П.* Методы исследования механических свойств грунтов. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. 93 с.
15. *Иваникова Н.П.* Физико-химические свойства грунтов и методы их исследования. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. 67 с.
16. *Иванов И.П.* Определение показателей сопротивления сдвигу грунтов, характеризующих их естественную прочность // Вестник ЛГУ. 1975. № 6. С. 73–79.
17. *Кульчицкий Л.И. Габибов Ф.Г.* Методы исследования свойств глинистых грунтов. Баку: Адильоглы, 2004. 185 с.
18. *Осипов В.И.* Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Грунтоведение. 2013. № 2. С. 3–35.
19. *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.
20. *Осипов В.И., Соколов В.Н.* Глины и их свойства. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
21. *Охотин В.В.* Грунтоведение. СПб.: ЦГГ, 2008. 231 с.
22. *Разоренов В.Ф.* Пенетрационные испытания грунтов. М.: Стройиздат, 1968. 182 с.
23. *Ребиндер П.А. Семененко Н.А.* О методе погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств пластично-вязких тел // Доклады АН СССР. 1949. Т. 64. 835 с.
24. РСН 51-84. Инженерные изыскания для строительства. Производство лабораторных исследований физико-механических свойств грунтов. М.: Изд-во ПНИИС, 1984. 38 с.
25. *Соколов В.Н.* Инженерно-геологическая классификация микроструктур глинистых пород // Инженерная геология. 1988. № 4. С. 25–41.
26. *Соколов В.Н.* Модели микроструктур глинистых грунтов // Инженерная геология. 1991. № 6. С. 32–40.
27. ASTM D3441-98. Standard test method for deep, quasi-static, cone and friction-cone penetration tests. ASTM International, 1998.
28. ASTM D5778-95(2000). Standard test method for performing electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils. ASTM International, 2000.
29. CEN ISO/TS 17892-6:2004. Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 6. Fall cone test. CEN, 2004.
30. NF P94-052-1:1995. Sols. Reconnaissance et essais. Determination des limites d'Atterberg. Partie 1. Limite de liquidite. Methode du cone de penetration [Soil : investigation and testing. Atterberg limit determination. Part 1. Liquid limit. Cone penetrometer method]. NF, 1995 (Fr.).
31. SS 02 7125:1991. Geotechnical test methods. Undrained shear strength. Fall cone test cohesive soil. SS, 1991.