

# Показатель текучести и консистенция – основные физико-химические показатели состояния грунтов

## Авторы

**ЗДОБИН ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ**

Преподаватель Санкт-Петербургского государственного университета, ученый секретарь Охотинского общества  
грунтоведов, д.г.-м.н.  
zdobin\_soil@mail.ru



**СЕМЕНОВА ЛАРИСА КОНСТАНТИНОВНА**

Начальник грунтовой испытательной лаборатории ОАО «Трест геодезических работ и инженерных изысканий  
(Трест ГРИИ)»  
trestgrii\_lab@mail.ru



**11**

ИЮЛЯ  
2018

31886

**В преддверии конференции «Грунтовая лаборатория – 2018» редакция журнала «ГеоИнфо» запускает серию публикаций, посвященных лабораторным исследованиям грунтов.**

**В настоящей статье рассматриваются термины, описывающие состояния грунта: «показатель текучести» и «консистенция».**

**Доказывается их различная физико-химическая природа.**

**Приводятся способы применения лабораторного пенетрометра Бойченко для определения консистенции, пределов пластичности и выбора вертикальных нагрузок для определения прочностных свойств грунтов при срезных испытаниях.**

**Автор статьи является руководителем группы по разработке 6 государственных стандартов в области лабораторных испытаний грунтов для строительства.**



Телеграм-канал журнала

**Геоинфо**  
Независимый электронный журнал

- Новости
- Статьи
- Обсуждения



Показатель текучести, наряду с гранулометрическим составом, естественной (природной) влажностью, плотностью грунта, плотностью частиц грунта, числом пластичности является важнейшим классификационным показателем грунта: свойство грунта I порядка – объективный критерий естественноисторического образования, существующий вне зависимости от применяемого метода его определения.

В настоящее время, как в теоретическом грунтоведении, так и в практике лабораторных исследований грунтов для целей инженерных изысканий широко используется показатель текучести  $I_L$

$$I_L = W - W_p / W_L - W_p, \quad (1)$$

Согласно ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация» (Приложение Б, таб. Б19) по показателю текучести ( $I_L$ ) в соответствии с частной инженерно-геологической классификация грунтов, все связанные дисперсные минеральные грунты разделены согласно таблице 1 [1].

**Таблица 1.** Классификация глинистых грунтов по показателю текучести

| Разновидность глинистых грунтов | $I_L$       |
|---------------------------------|-------------|
| <b>Супесь:</b>                  |             |
| твердая                         | <0          |
| пластичная                      | 0 – 1       |
| текучая                         | >1          |
| <b>Суглинки и глины:</b>        |             |
| твердые                         | <0          |
| полутвердые                     | 0 – 0,25    |
| тугопластичные                  | 0,25 – 0,50 |
| мягкопластичные                 | 0,50 – 0,75 |
| текучепластичные                | 0,75 – 1,00 |
| текучие                         | > 1,00      |

Но необходимо отметить, что показатель  $I_L$  расчетный, он характеризует грунты в нарушенном сложении и поэтому не дает правильного представления об их состоянии в естественном сложении. Кроме этого пределы пластичности определяются с определенной лабораторной погрешностью, что влечет за собой неправильное представление о показателе текучести грунтов даже нарушенной структуры.

В связи с вышесказанным ленинградский грунтовед П.О. Бойченко в 1964 году теоретически обосновал и ввел в научный оборот совершенно определенный термин – **показатель консистенции** ( $C_B$ ) грунта **ненарушенной структуры** [2]. Показатель  $C_B$  – интеграционный показатель, включающий в себя естественную влажность грунта, его плотность, особенности текстуры и микростроения и зависящий, в конечном итоге, прежде всего от типов контактов между отдельными элементами грунтовой системы, а также площади этих контактов. Следовательно, показатель  $C_B$  по определению объективен (показатель состояния грунта – свойство грунта первого порядка) и определяет природное (исходное) состояние грунта в естественном сложении – первоначальное фациально-генетическое состояние грунтовой системы.

Поэтому равенство терминов «показатель текучести» и «консистенция» на наш взгляд недопустимо, ибо это принципиально разные, по сути, показатели

физико-химического состояния грунтов.

# Определение консистенции грунта в естественном сложении

Показатель консистенции  $S_v$  для грунтов ненарушенной структуры определяется при помощи конуса Бойченко методом лабораторной пенетрации (рис. 1). Конус имеет угол раскрытия  $30^\circ$  и вес 300 грамм. Образец грунта загружают в металлическое кольцо и устанавливают на основание пенетromетра. Конус опускают до соприкосновения с защищенной поверхностью грунта, чтобы он слегка его касался и прочерчивал тонкую линию, нажимают кнопку стопора, дают возможность конусу погрузиться в грунт под действием собственного веса и через 5 секунд берут отсчет с точность до 0,1 мм. В ходе опыта определяют глубину погружения конуса в грунт  $h$  мм (3–5 раз), в качестве результата опыта принимают среднее арифметическое глубины погружения конуса, которое и используют для определения показателя консистенции по специальной таблице 2.



Рис. 1. Конус (пенетрометр) П.О. Бойченко. Общий вид

Таблица 2. Классификация грунтов по показателю консистенции

| Глубина погружения конуса, $h$ в мм. | $S_v$         | Консистенция     |
|--------------------------------------|---------------|------------------|
| $< 1,5$                              | $< -0,25$     | твердая          |
| $1,5 - 4,0$                          | $-0,25 - 0$   | полутвердая      |
| $4,0 - 7,4$                          | $0 - 0,25$    | тугопластичная   |
| $7,4 - 16,0$                         | $0,25 - 0,75$ | мягкопластичная  |
| $16,0 - 22,5$                        | $0,75 - 1,00$ | текучепластичная |
| $> 22,5$                             | $> 1,00$      | текучая          |

Таблица 3. Переход от величины погружения конуса (h) к показателю  
консистенции грунта Св

| h<br>мм | Св    | h<br>мм | Св   | h<br>мм | Св   | h<br>мм | Св   | h<br>мм | Св   | h<br>мм | Св   |
|---------|-------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| 1.0     | -0.27 | 4.6     | 0.05 | 8.2     | 0.31 | 11.8    | 0.53 | 17.0    | 0.78 | 35.0    | 1.44 |
| 1.2     | -0.25 | 4.8     | 0.07 | 8.4     | 0.32 | 12.0    | 0.55 | 18.0    | 0.82 | 36.0    | 1.47 |
| 1.4     | -0.23 | 5.0     | 0.08 | 8.6     | 0.33 | 12.2    | 0.56 | 19.0    | 0.86 | 37.0    | 1.50 |
| 1.6     | -0.21 | 5.2     | 0.09 | 8.8     | 0.35 | 12.4    | 0.57 | 20.0    | 0.90 | 38.0    | 1.54 |
| 1.8     | -0.19 | 5.4     | 0.11 | 9.0     | 0.36 | 12.6    | 0.58 | 21.0    | 0.94 | 39.0    | 1.58 |
| 2.0     | -0.17 | 5.6     | 0.12 | 9.2     | 0.37 | 12.8    | 0.59 | 22.0    | 0.98 | 40.0    | 1.61 |
| 2.2     | -0.16 | 5.8     | 0.13 | 9.4     | 0.39 | 13.0    | 0.61 | 23.0    | 1.02 | 41.0    | 1.64 |
| 2.4     | -0.13 | 6.0     | 0.15 | 9.6     | 0.4  | 13.2    | 0.62 | 24.0    | 1.06 | 42.0    | 1.67 |
| 2.6     | -0.12 | 6.2     | 0.16 | 9.8     | 0.41 | 13.4    | 0.63 | 25.0    | 1.10 | 43.0    | 1.70 |
| 2.8     | -0.09 | 6.4     | 0.17 | 10.0    | 0.43 | 13.6    | 0.64 | 26.0    | 1.13 | 44.0    | 1.73 |
| 3.0     | -0.08 | 6.6     | 0.2  | 10.2    | 0.44 | 13.8    | 0.65 | 27.0    | 1.17 | 45.0    | 1.77 |
| 3.2     | -0.07 | 6.8     | 0.21 | 10.4    | 0.45 | 14.0    | 0.66 | 28.0    | 1.20 | 46.0    | 1.85 |
| 3.4     | -0.05 | 7.0     | 0.23 | 10.6    | 0.46 | 14.2    | 0.67 | 29.0    | 1.24 | 47.0    | 1.87 |
| 3.6     | -0.03 | 7.2     | 0.24 | 10.8    | 0.47 | 14.4    | 0.68 | 30.0    | 1.27 | 48.0    | 1.89 |
| 3.8     | -0.01 | 7.4     | 0.25 | 11.0    | 0.48 | 14.6    | 0.69 | 31.0    | 1.30 |         |      |
| 4.0     | 0.00  | 7.6     | 0.27 | 11.2    | 0.49 | 14.8    | 0.7  | 32.0    | 1.33 |         |      |
| 4.2     | 0.01  | 7.8     | 0.28 | 11.4    | 0.5  | 15.0    | 0.71 | 33.0    | 1.37 |         |      |
| 4.4     | 0.03  | 8.0     | 0.29 | 11.6    | 0.52 | 16.0    | 0.74 | 34.0    | 1.40 |         |      |

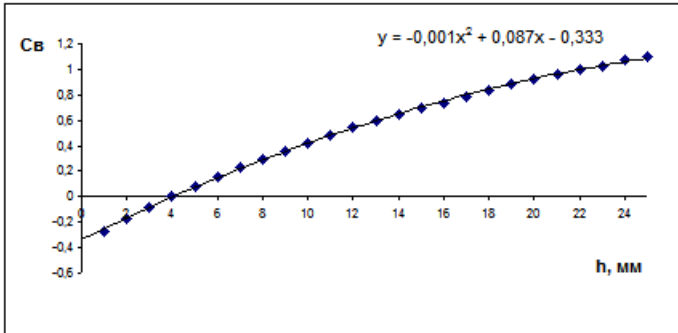


Рис. 2. График зависимость Св от h

Грунты по показателю текучести IL могут отличаться (и отличаются) от  
показателя консистенции  $C_v$ . Для оценки естественного состояния грунта

вводится **показатель структурной прочности грунта**:

$$K_{сп} = C_B - I_L \quad (2)$$

где,  $C_B$  – показатель консистенции,  $I_L$  – показатель текучести.

По этому простому показателю грунты можно разделить на две группы:

$K_{сп} > 0$  – грунты структурно устойчивые,  $K_{сп} \leq 0$  – грунты структурно неустойчивые; и  $K_{сп} = 0$  – грунты структурно однородные

Например, между двумя показателями консистенции  $I_L$  и  $C_B$  для грунтов Санкт-Петербурга и Ленинградской области существует взаимосвязь (рис 3).

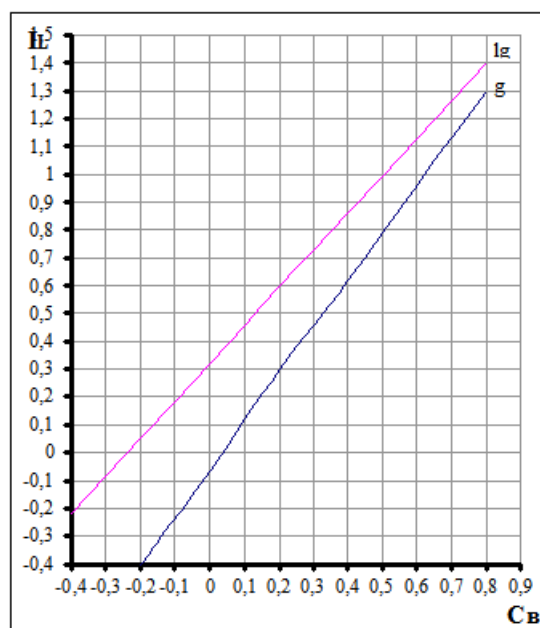


Рис. 3. График зависимости показателя текучести и консистенции для моренных (g) и озерно-ледниковых (lg) отложений территории Санкт-Петербурга (по данным «Трест ГРИИ»).

Анализируя данный график, можно констатировать, что на основании показателя  $I_L$  грунты в нарушенном состоянии характеризуются как менее прочные, чем по  $C_B$ , характеризующего грунты в естественном сложении. Смещения наименования консистенции по показателю  $I_L$  в сравнении с  $C_B$  могут достигать 2–4 подформ для озерно-ледниковых грунтов, что связано с их высокой структурной прочностью. И наоборот для ледниковых супесей возможно  $C_B > I_L$ , что связано с низкой структурной прочностью и погрешностями определения пределов пластичности. Таким образом, сравнение этих показателей дает возможность оценить структурную прочность грунта. Следовательно, определив  $C_B$  и  $I_L$ , и воспользовавшись этим графиком, можно достаточно уверенно определить генезис грунта. Или, зная один из показателей консистенции, определить или проконтролировать другой.

## Определение пределов пластичности грунта

Важнейшим классификационным показателем глинистых грунтов является число пластичности. Понятно, что пределы пластичности в общем виде характеризуют тип структурных связей между отдельными элементами грунтовой системы. Если верхний предел пластичности (предел текучести) характеризует, по всей вероятности, переход структурных связей в грунте от ближних коагуляционных контактов к преимущественно дальним, то нижний, соответственно, переход ближних коагуляционных контактов к переходным (частично цементационным). Вопрос о типе микростроения грунтов при влажностях нижнего и верхнего пределов пластичности и, соответственно, типах контактов между отдельными частицами грунта прояснит применение растровой электронной микроскопии с применением 3D-томографа.

Главным преимуществом применения конуса Бойченко является определение пределов пластичности грунта одним прямым методом (одним усилием), что полностью исключает субъективность лабораторного определения данных показателей разными методами (методом погружения балансировочного конуса Васильева в грунт для предела текучести и методом раскатывания грунта в жгут для определения предела раскатывания).

Консистенция грунта при погружении конуса на 22,5 мм соответствует влажности верхнего предела пластичности, а на 4 мм – влажности нижнего предела пластичности. Одну пенетрацию следует проводить при влажности грунта, соответствующей погружению конуса от 3 до 6 мм, а вторую от 18 до 25 мм, т.к. зависимость между глубиной погружения конуса и влажностью грунта, построенная в логарифмическом масштабе, близка к линейной.

Грунт для определения нижнего предела увлажняют, если он находится в твердой или полутвердой консистенции, или подсушивают, если он слишком влажный. Затем укладывают слоями с послойным трамбованием в стандартное срезное кольцо диаметром 50 и высотой 20 мм. Кольцо устанавливают на основание пенетromетра, подводят конус к поверхности грунта, нажимают кнопку и дают возможность конусу внедриться в грунт в течение 5 секунд. Проводят 3–5 измерений. Глубина погружения конуса в грунт должна находиться в диапазоне от 3 до 6 мм. После проведения пенетрации грунт из кольца отбирают для определения влажности.

Для определения верхнего предела пластичности грунт протирают через сито 1 мм, увлажняют, тщательно перемешивают и укладывают в кольцо диаметром 50 мм и высотой 30 мм. Производят пенетрацию, глубина погружения конуса должна находиться в интервале глубин 18–25 мм. Аналогичным способом отбирают грунт для определения влажности.

После определения влажности грунта строится простая зависимость  $I_g W = f(I_g h)$  и по номограмме определяется верхний и нижний пределы пластичности грунта  $I_g W_P = f(I_g 22,5)$  и  $I_g W_P = f(I_g 4)$  (рис. 4).

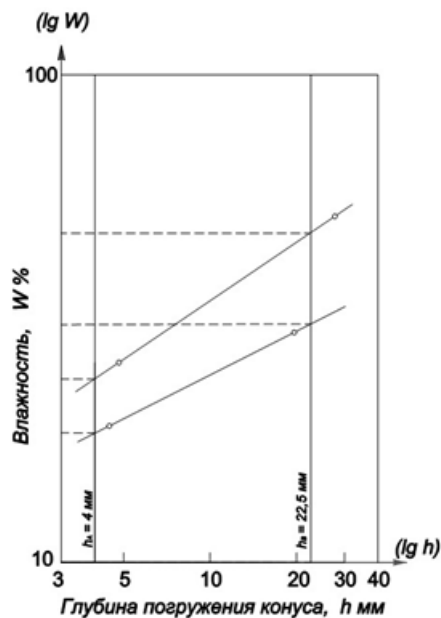


Рис. 4. Графический способ установления численных значений пределов пластичности по логарифмической сетке (по П.О. Бойченко [2]):  $W$  — влажность грунта, %;  $h$  — глубина погружения конуса Бойченко в грунт, мм;  $h_A$  — глубина погружения конуса при нижнем пределе пластичности (4 мм);  $h_B$  — глубина погружения конуса при верхнем пределе пластичности (22,5 мм).

Конус Бойченко незаменим при определении консистенции грунта в полевых условиях. Это, по существу, единственный объективный показатель состояния грунта при работе с водонасыщенными, тиксотропными и скрытотекучими грунтами, т.е. с теми грунтами, которые могут (и меняют) свое исходное состояние при транспортировке образца в стационарную грунтовую лабораторию. Применение конуса Бойченко снимает многие (если не все) вопросы исходного состояния грунта. Порой это единственный аргумент в бесконечных (и бессмысленных) спорах с проектировщиками, исповедующими устаревшие представления о механических свойствах грунта и пытающихся диктовать схемы определения прочностных свойств грунтов (КН и особенно КД-схемы проведения испытаний водонасыщенных глинистых и пылевато-глинистых грунтов) с учетом т.н. «бытового давления». Применение конуса Бойченко позволяет избавиться от совершенно фантастических чисел, которые выдают некоторые грунтовые испытательные лаборатории в своих отчетных материалах и которые в реальной природной обстановке просто отсутствуют.

## Определение вертикальных нормальных нагрузок при определении прочностных свойств грунта

Наконец, третьим (по счету, но не по важности) преимуществом показателя СВ является методологически правильный, учитывающий естественное сложение грунта выбор нормальных давлений ( $\sigma_1$ ) для определения прочностных свойств ( $c$  и  $\phi$ ) грунтов при производстве одноплоскостных срезных испытаний по неконсолидированно-недренированной схеме.

В 1975 году профессор кафедры грунтоведения Ленинградского университета И.П. Иванов разработал **теорию естественной прочности грунта**: грунт реагирует на внешние воздействия, начиная (и заканчивая так же) с какой-то определенной величины. И эта величина зависит, прежде всего, от исходного состояния грунта [6]. Сущность метода определения естественной прочности заключается в правильном выборе нормальных давлений, значения которых должны находится в строго определенном для данного грунта интервала и не вызывать с одной стороны растягивающих напряжений, а с другой стороны доуплотнения грунта или появления порового давления. Величина нормальных давлений должна находится в диапазоне от  $\sigma_{min}$  до  $\sigma_{max}$ . 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 прочности, у водонасыщенного грунта возникает поровое давление, что приводит к снижению получаемых прочностных характеристик грунта. В общем виде значение нормальных вертикальных давлений, исходя из теории естественной прочности грунта, представлены в таблице 4.

**Таблица 4.** Значения нормальных давлений при одноплоскостном срезе (по данным «Трест ГРИИ»)

| I <sub>L</sub> |                |                        | C <sub>B</sub> | Консистенция   | Глубина погружения конуса, мм |
|----------------|----------------|------------------------|----------------|----------------|-------------------------------|
|                | по ГОСТу       | реальные               |                |                |                               |
| >1,0           | 0,25-0,75-1,25 | 0,25-0,5-0,75?         | >0,5           |                | >22,5-11,3                    |
| 0,5-1,0        | 0,5-1,0-1,5    | 0,25-0,5-0,75-1,0?     | 0,5 – 0,25     | тек/пл – м/пл  | 11,3-7,4                      |
| 0,5-0,25       |                | 0,5-1,0-1,5?           | 0,25 – 0       | т/пл           | 7,4-4                         |
| 0,25-0         |                | 1,0-1,5-2,0            | ≤0             | полутвердая    | 4-3                           |
| <0             |                | 1,0-2,0-3,02,0-3,0-4,0 | 0 – -0,25      | п/тв – твердая | 3-22-1.5                      |
| <0             |                | 2,0-4,0-6,0            | < -0,25        | твердая        | <1,5                          |

Особую актуальность понятие «консистенция грунта» и его смысловое наполнение приобрело в последнее время, когда лидером современного мирового генетического грунтоведения академиком РАН В.И. Осиповым была предложена теоретически безупречная и имеющая широчайшее практическое применение «теория эффективных напряжений в грунтах» (теория Терцаги-Осипова). Консистенция грунта, на наш взгляд, полностью вписывается в

данную теорию как самостоятельный показатель категории грунта естественного сложения.

Необходимо отметить, что определение консистенции грунта в естественном сложении широко применяется в практике лабораторных испытаний грунтов в Санкт-Петербурге (Ленинграде) с середины 70-х гг. XX века ведущими изыскательскими организациями и зарекомендовал себя как очень полезный и крайне информативный показатель со всех точек зрения.

Теория и практика лабораторной пенетрации грунтов требует совершенно отдельного разговора. Достаточно полное описание применения данного метода нашло свое отражение в работах В.Ф. Разоренова [7], И.П. Иванова [6], Н.П. Иваниковой [5]. Особенно подробно метод рассмотрен в исследованиях Е.Н. Богданова [3, 4].

На наш (и не только) взгляд, сам метод пенетрации грунтов (различными конусами с углами при вершине 30°, 60°, 90° и сферическим штампом) незаслуженно забыт и вообще исключен из практики лабораторных испытаний грунтов, хотя по мнению некоторых ученых, которое мы вполне разделяем, таит в себе явные преимущества в сравнении с другими методами определения прочностных свойств грунтов [3, 4].

## Выводы

1. Необходимо четко, на понятийном уровне разделить показатели состояния грунтов: показатель текучести –  $I_L$  – оставить для грунтов нарушенной структуры, а показатель консистенции –  $C_B$  – за грунтами ненарушенной структуры.

2. Ввести понятие консистенции грунта ненарушенного сложения в отечественные нормативные документы.

Исходя из исключительной важности физико-химического показателя состояния грунта – консистенции грунта в естественном сложении Охотинское общество грунтоведов и Трест геодезических работ и инженерных изысканий инициировал и разработал ГОСТ 34276-2017 «Грунты. Метод лабораторного определения удельного сопротивления пенетрации» введенный в действие с 01.03.2018. К сожалению, данный нормативный документ был существенно урезан, ибо в процессе обсуждения противниками разделения данных терминов («показатель текучести грунтов» в нарушенном строении и «консистенция грунтов» в естественном сложении выступили представители проектировщиков, мотивируя это исключительно тем, что в существующих нормативных документах он отсутствует.

Тем не менее, существует рабочая инструкция (стандарт предприятия) для комплексного использования данного лабораторного метода в практике испытаний грунтов для строительства (ПИ-06-2015 – полный текст размещён на сайте Охотинского общества грунтоведов – [www.okhotin-grunt.ru](http://www.okhotin-grunt.ru)), которая успешно используется грунтовыми испытательными лабораториями во всех регионах Российской Федерации.

Немаловажно, что финансовые затраты производственных организаций в объеме определения консистенции, верхнего и нижнего пределов пластичности грунтов минимальны: конус Бойченко серийно выпускается рядом отечественных компаний по производству лабораторного оборудования.

Авторы надеются, что здравый смысл возобладает и в учебно-методической литературе, и в нормативных документах, регламентирующих лабораторные испытания грунтов для строительства, будут четко определены совершенно различные показатели состояния грунтов «показатель текучести» – для грунтов в нарушенном сложении и «показатель консистенции» – для грунтов в естественном сложении.

## Список литературы

1. ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация» М., Сандартинформ, 2013. 38 с.
2. *Бойченко П.О.* Определение пределов пластичности и консистенции глинистых грунтов методом конуса. Л., ЛГУ, 1964, 47 с.
3. *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.
4. *Богданов Е.Н.* О механических свойствах глинистых грунтов. Грунтоведение № 1, 2012, с. 62-70.
5. *Иваникова Н.П.* Методы исследования механических свойств грунтов. СПб, СПбГУ, 1996, 93 с.
6. *Иванов И.П.* Определение показателей сопротивления сдвигу грунтов характеризующих их естественную прочность. Вестник ЛГУ, 1975, № 6, с. 73-79.
7. *Разоренов В.Ф.* Пенетрационные испытания грунтов. М., 1980.