

УДК 624.131

Полканов В.Н.<sup>1</sup>, Кырлан А.В.<sup>1</sup>, Чебан О.С.<sup>1</sup>, Фуньеру Н.Г.<sup>1</sup>

## К вопросу изучения длительной прочности неоген-четвертичных глинистых грунтов Молдовы

### Abstract

*The research aims for continuous learning of the nature of clayey soils strength of Moldova. Mechanical properties were studied on shear devices in different speed modes of tests. For studied soil, it was determined how the deformation degree of the clays and the presence of natural weakened zones influence the value of critical shear deformation. As result, were obtained the values of “the creep threshold” that define the character of the possible development of slope deformations. It was determined, that the diminution of the shear speed entails soil strength decrease (up to 25%).*

*It is proposed to develop a simplified method, which will permit experts to determine long-term strength, corresponding to the building lifespan, without conducting lasting and expensive experiments.*

**Keywords:** clay soils, creep threshold, long-term strength.

### Rezumat

*Studiul este direcționat spre cunoașterea continuă a naturii rezistenței pământurilor argiloase ale Moldovei. Proprietățile mecanice (de rezistență) au fost studiate efectuând încercări cu ajutorul aparatelor de forfecare pentru diferite regimuri de viteză. A fost stabilită influența gradul de deformabilitate a argilelor și prezența zonelor slabe asupra valorilor deformațiilor critice la forfecare. Au fost obținute valorile „limitei curgerii lente”, ce definesc natura posibilelor deformații pe versanți. A fost stabilită reducerea rezistenței pământurilor (până la 25%) odată cu scăderea vitezei de forfecare.*

*Se propune elaborarea unei metode simplificate cu ajutorul căreia se va putea stabili rezistența de lungă durată, ce ar corespunde duratei de exploatare a construcției fără a efectua încercări de lungă durată și costisitoare.*

**Cuvinte cheie:** pământuri argiloase, limita de curgere, rezistența de lungă durată.

### Резюме

*Исследование направлено на дальнейшее познание природы прочности глинистых грунтов Молдовы. Прочностные свойства изучались на сдвиговых приборах при различном скоростном режиме проведения испытаний. Для изученных разновидностей, установлено влияние степени деформированности глин и наличия естественных зон ослабления на величину критических деформаций сдвига. Получены значения “порога ползучести”, определяющие характер возможного развития деформаций на склоне. Установлено снижение прочности грунта (до 25%), с уменьшением скорости сдвига.*

*Предлагается разработать упрощенную методику, с помощью которой специалисты смогут определить длительную прочность, отвечающую сроку службы сооружения, не проводя длительные и дорогостоящие опыты.*

**Ключевые слова:** глинистые грунты, порог ползучести, длительная прочность.

---

<sup>1</sup> Технический Университет Молдовы

## Введение

Длительная прочность является одним из наиболее важных и до конца не изученных вопросов механики грунтов. Практически с первой половины прошлого столетия и до настоящего времени в области реологии глинистых грунтов возникает множество споров [1-5]. Возникающие в этом вопросе неясности являются результатом недостаточно точной формулировки методики опытов, а также самой постановки вопроса. В одних случаях при проведении опытов отмечалось снижение прочности глинистых грунтов во времени, в других, наоборот, повышение [6]. В одной из последних работ П.А. Ляшенко [7] предлагает изучать природу сцепления и внутреннего трения глинистых грунтов с помощью построения модели поверхности скольжения. В рамках представленной модели рост скорости деформации трактуется, как перемещение группы контактов по участку поверхности скольжения, а уменьшение скорости - как огибание поверхностью скольжения группы наиболее крупных зёрен. Регистрация деформации с малым шагом (не более 0,005 мм) позволяет использовать испытание образца для определения характеристик микроструктуры и коэффициентов сдвиговой прочности Ш. Кулона. Поэтому, дальнейшее познание природы прочности грунтов, в том числе основанное на изучении особенностей строения глинистых грунтов, является одной из актуальных задач, требующей своего разрешения.

Выполненные ранее различными производственными организациями исследования, накопленный практический опыт и теоретические материалы по изучению природы прочности глинистых грунтов показывают, что единства мнений не существует. Задача усложняется необходимостью учёта региональных особенностей строения покровных отложений, представленных, в основном, песчано-глинистыми породами неоген-четвертичного возраста. В условиях природного залегания прочность покровных отложений зависит от целого ряда факторов. Определяющим, на наш взгляд, при прочих равных условиях, является стадия развития оползневого склона [8, 9]. В силу этого, прочностные характеристики в зоне оползневого смещения, скорость ползучести (скорость вязко-пластического течения) следует рассматривать, как взаимно определяющие понятия. Целью настоящих исследований явилось дальнейшее изучения природы прочности неоген-четвертичных покровных отложений Молдовы.

### 1. Приборы, оборудование, методика проведения испытаний

В разработке методики исследования длительной прочности за последние десятилетия не произошло сколько-нибудь существенных открытий, позволяющих рекомендовать производственным организациям отказаться от длительных и дорогостоящих методов. Определённым решением вопроса может явиться накопление и обобщение данных экспериментального определения параметров длительной прочности для различных типов грунтов, проведённых по уже существующим методикам на одинаковых по типу приборах. При наличии противоречивых взглядов на вопросы длительной прочности, естественно, возникла необходимость в проведении дополнительных исследований.

Изучение физических свойств исследуемых грунтов проводилось по стандартным методам. Для изучения прочности использовались приборы прямого среза. Опыты проводились по методу “быстрого сдвига”, а также по методу «с постоянной скоростью деформирования» [4]. Скоростной режим испытаний изменялся от  $v = a \cdot 10^{-5}$  см/с до  $v = a \cdot 10^{-8}$  см/с.

## 2. Результаты выполненных исследований и их обсуждение

Исследования проводились на двух опорных участках: участок 1 - выемка на ПК 14406... ПК 14409 автодороги M21; участок 2 - оползневой склон на окраине с. Порумбрей.

Результаты определения физических характеристик грунтов, отобранных с первого участка, представлены на рис. 1, 2.

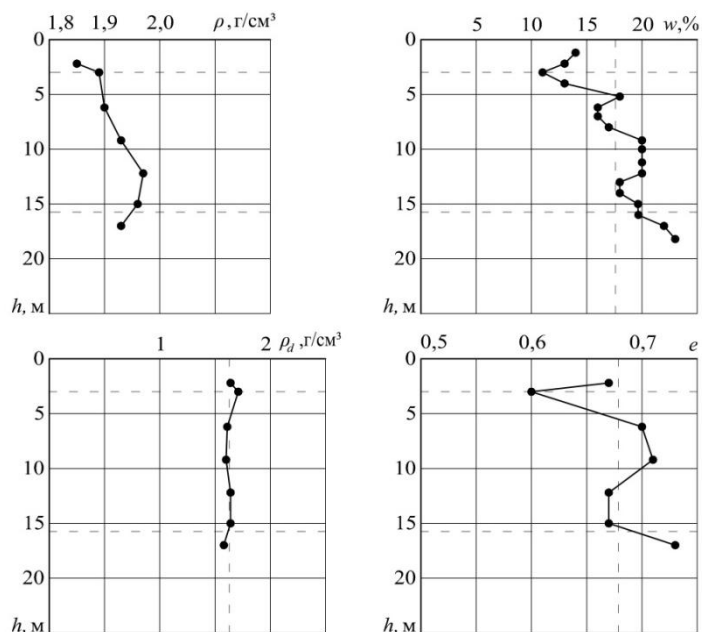


Рис. 1. Графики рассеивания физических характеристик грунта по глубине.

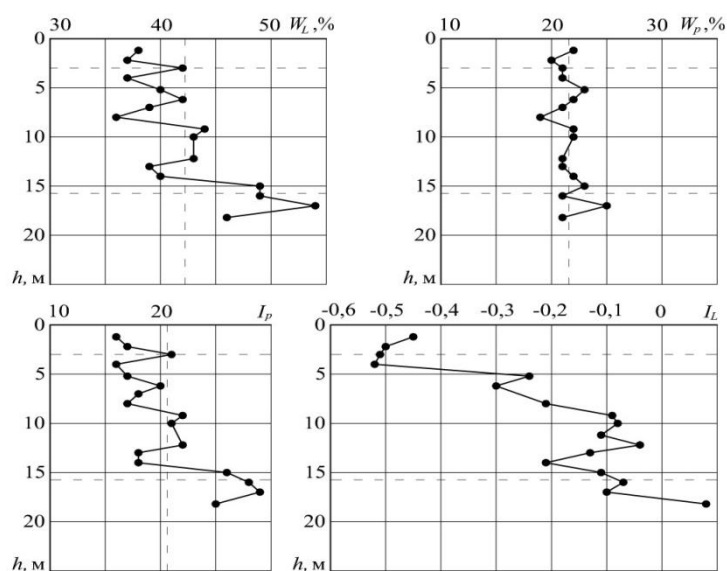


Рис. 2. Графики рассеивания характеристик пластичности грунта по глубине.

Все исследуемые грунты в разной степени окарбонатизированы. Несмотря на несколько завышенные значения числа пластичности  $I_p$ , толща до глубины 15 м может быть отнесена к тяжелым суглинкам.

Верхняя толща суглинков до глубины 3 м окрашена в более светлые тона, сильно окарбонатизирована, характеризуется повышенной влажностью. Нижняя часть исследуемой толщи (до глубины 15 м) представлена краснобурыми суглинками.

Результаты определения параметров прочности представлены на рис. 3.

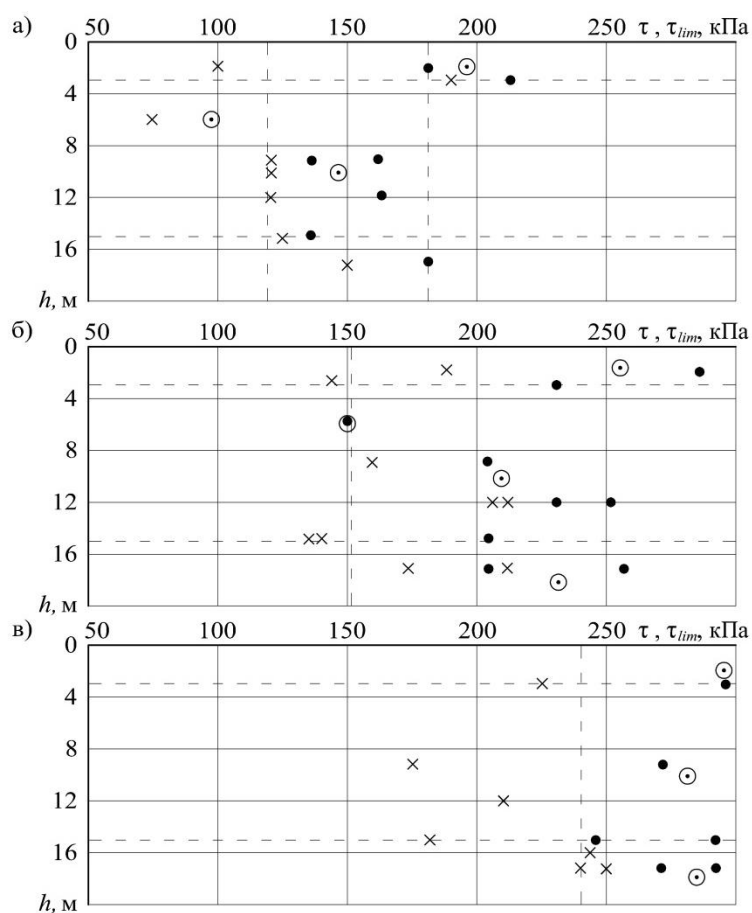


Рис. 3. График рассеивания сопротивления сдвигу с глубиной.

а)  $\sigma=100$ кПа; б)  $\sigma=200$ кПа; в)  $\sigma=300$ кПа;

● – критическое сопротивление сдвигу,

$\tau$ ; × – предельное сопротивление сдвигу,

$\tau_{lim}$ ; ⊙ –  $\tau_{lim}$  для выделенных глубин.

В естественном состоянии, как ранее отмечалось, большинство испытанных образцов окарбонатизированы, имеют твердую консистенцию и обладают значительным структурным сцеплением. Это во многом определяет характер деформирования грунта в процессе сдвига и, в ряде случаев, затрудняет выбор начальной критической нагрузки, необходимой для построения графиков сдвига и

назначения расчетных показателей прочности с учетом временного фактора. Поэтому выбор пределов прочности осуществлялся по графикам, построенных на основе значений начальных критических напряжений, определенных по графикам вида  $\lambda = f(\tau)$  (рис 4). Это позволило получить значения прочностных характеристик отличные от значений, определяемых по предельно допустимым нагрузкам.

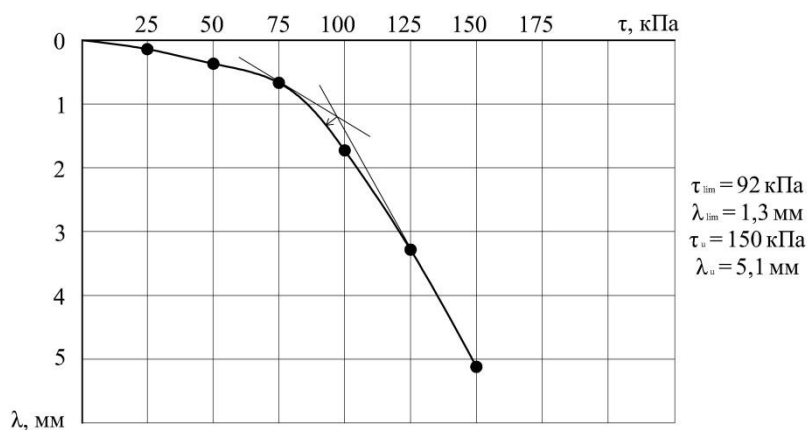


Рис. 4. Графики вида  $\lambda = f(\tau)$  Естественная поверхность.  
Суглинок тёмно-бурый. Скв. 127,  $h = 6$  м.

Установлено, что даже в пределах одного уплотняющегося давления критическая деформация лежит в пределах 1,5...5,8 мм. Наличие микрострессов и, особенно, зеркал скольжения во многом предопределяет значение критической деформации сдвига.

В естественном состоянии грунты обладают сравнительно невысокой природной влажностью, увеличивающейся с глубиной от 12 до 24 %. Влажность более 20 % наблюдалась с глубины более 8 м. С этой глубины также отмечается увеличение плотности грунта:  $\rho = 1,85...1,92$  г/см<sup>3</sup> (до глубины 8 м) и  $\rho = 1,95...1,97$  г/см<sup>3</sup> (на глубине более 8 м), а также увеличение степени влажности  $S_r$  – до 0,84. Коэффициент пористости изменяется незакономерно, среднее значение составляет 0,730. С глубиной наблюдается рост значений влажности на границе текучести (от 36 до 50 %), числа пластичности (от 15 до 30) и показателя текучести (от -0,45 до 0,08). Грунты изучаемой толщи до глубины 18 м находятся в твердом состоянии.

По данным рекогносцировочных обследований и предварительной обработке результатов лабораторных испытаний грунтов, в глинистой толще было выделено четыре разновидности, соответствующие глубине залегания: 1-3 м, 3-7 м, 7-15 м и более 15 м. На глубине 12 м для образцов с зафиксированными зеркалами скольжения величина деформации составляет 1,5 мм (при  $\sigma = 100$  кПа). Интересно отметить, что в интервале давлений 100-300 кПа предельная деформация практически не зависит от уплотняющего давления. Ее значение изменяется от 0,6 до 1,7 мм. В среднем, при  $\sigma = 100$  кПа, эти показатели соответствуют значению критической деформации образцов с зеркалами скольжения.

Для образцов, отобранных с глубины 2-3 м при влажности 11-13 % и показателе текучести  $I_L = -0,50$  характерна повышенная прочность ( $S = 0,23\sigma + 130$ , кПа), которая, естественно, может снижаться в процессе эксплуатации выемки, особенно при изменении режима увлажнения в зоне аэрации.

При испытании монолита, отобранного на глубине 6 м, несмотря на отсутствие видимых зон ослабления, были зафиксированы минимальные сдвигающие усилия. Полученное уравнение графика сдвига имеет вид  $S = 0,23\sigma + 50$ , кПа. Данное уравнение практически совпадает с уравнением, полученным для подготовленной поверхности:  $S = 0,25\sigma + 50$ , кПа. Это может быть объяснено потерей структурного сцепления за счет наличия микрзон ослабления формирующейся в откосе перемычатой зоны.

Приближенные уравнения прочности для образцов в интервале глубин 7-15 м и более 15 м соответственно имеют вид:  $S = 0,29\sigma + 100$ , кПа и  $S = 0,36\sigma + 120$ , кПа.

Следует отметить, что несмотря на выявленные при проведении опытов на сдвиг в образцах грунта, отобранных с глубин 10-15 м, зоны ослабления, влияние последних практически не сказалось на значениях разрушающих усилий. Это можно объяснить значительной окarbonатизированностью образцов. Тем не менее, наличие возможных зон ослабления на отмеченных глубинах должно учитываться при выборе расчетной схемы для оценки длительной устойчивости откосов проектируемой выемки.

Для установления степени влияния на прочность исследуемых грунтов возможного дополнительного увлажнения, а также выявления характера зависимости их прочности от консистенции, часть образцов была помещена во влажный песок. Образцы выдерживались в ящиках с влажным песком от 3-х до 33-х суток. Это позволило испытать образцы в диапазоне полутвердой, тугопластичной и пластичной консистенции.

Для образцов, отобранных с глубин 3-15 м, были построены точечные графики рассеивания вида  $\tau = f(I_L)$  (рис. 5).

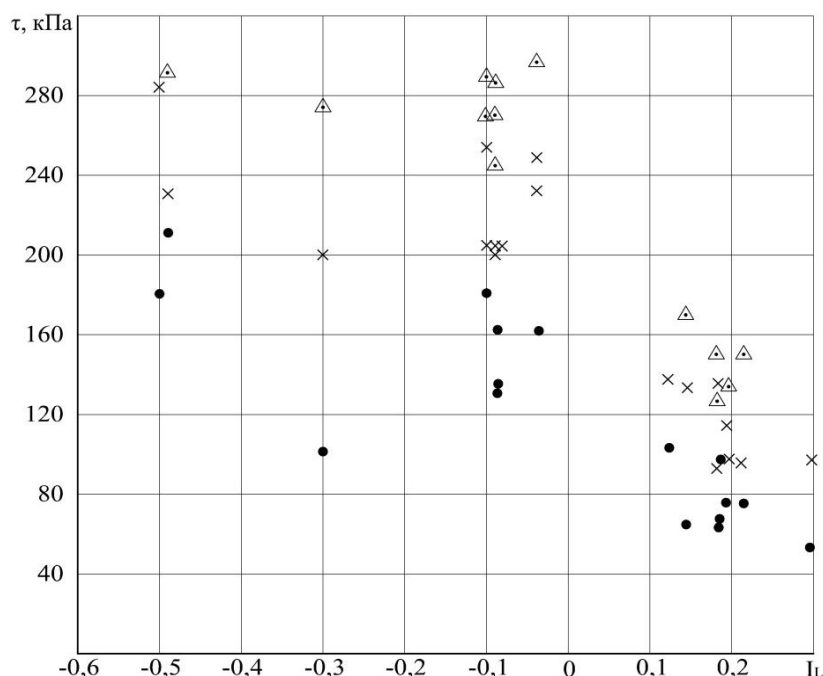


Рис. 5. График рассеивания сопротивляемости сдвигу от показателя текучести.

● –  $\sigma = 100$  кПа; × –  $\sigma = 200$  кПа; △ –  $\sigma = 300$  кПа.

Результаты испытаний подтверждают неоднократно высказываемую Тимофеевой Т.А. и Полкановым В.Н. [6] мысль о том, что при природной влажности в интервале твердой консистенции в первую очередь проявляется влияние фактора дискретности, отражающего структурно-текстурные особенности грунта и степень нарушения структурных связей за счет естественных зон ослабления, определяющих характер деформирования жестких глин и перекрывающего влияние на прочность в массиве плотности, влажности и консистенции. Это характерно не только для большинства изученных оползневых неоген-четвертичных глинистых пород Молдовы, но и неогеновых глин Одессы и Кавказа, слагающих оползневые склоны. Фактор консистенции, отражающий роль связности в общем сцеплении и коэффициенте вязкости, начинает проявляться при переходе образцов из твердого в полутвердое и тугопластичное состояние, и в большей мере определяет характер деформирования пластичных глин. Приближенную зависимость  $\tau = f(I_L)$  оказалось возможным построить для образцов, испытанных по подготовленной поверхности сдвига, моделирующей потерю структурного сцепления. Используя метод плотности-влажности проф. Н.Н. Маслова [4] получены приближенные зависимости угла внутреннего трения и сцепления связности от консистенции (рис 6).

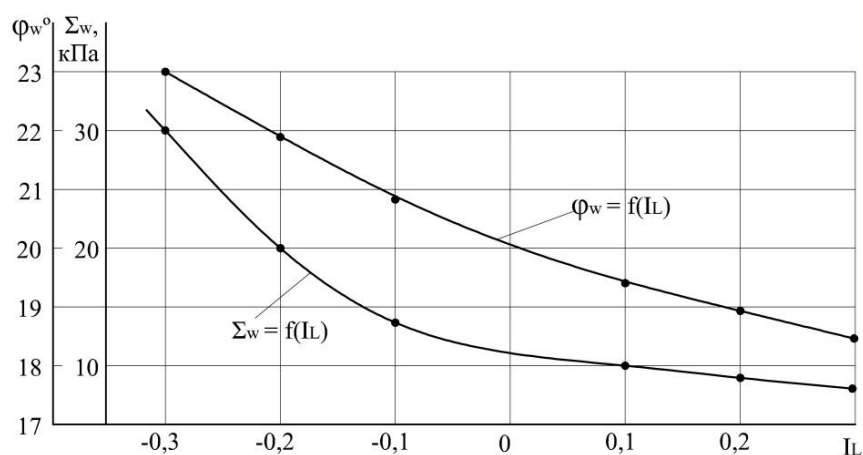


Рис. 6. Зависимость угла внутреннего трения ( $\varphi_w$ ) и сцепности ( $\Sigma_w$ ) от консистенции.

Анализ этих зависимостей показывает, что повышение консистенции в большей степени сказывается на снижении сцепности. При природной консистенции  $I_L = -0,20$  для толщи в интервале глубин 3-5, угол внутреннего трения и сцепление сцепности соответственно равны  $\varphi = 22^\circ$ ;  $\Sigma_w = 20$  кПа; после водонасыщения при  $I_L = 0,17$ ,  $\varphi = 19^\circ$ ,  $\Sigma_w = 10$  кПа. Вместе с тем отмечается, что с ростом консистенции возможно дальнейшее снижение угла внутреннего трения, тогда как падение сцепления сцепности практически прекращается.

Для окончательного выяснения характера зависимости необходимо провести испытания грунтов пластичной консистенции.

Для образцов грунта отобранных на оползневом склоне, расположенном на окраине с. Порумбрей (участок 2), проводились длительные опыты с целью

определения порога ползучести, а также для изучения влияния скорости и режима испытаний на значения прочности исследуемых грунтов.

На образцах естественной структуры было выполнено 11 длительных испытаний. Продолжительность опытов составляла от 7 часов до 62 суток. Результаты исследований обобщены в табл.1.

Таблица 1

## Определение порога ползучести по опытам "с постоянной скоростью"

Объект	Скважина	Глубина отбора монолита $h$ , м	Тип грунта	Консистенция грунта $I_L$ , долей	Нормальное давление $\sigma$ , кПа	Величина деформация $\lambda$ , мм	Продолжительность опыта $t$ , час	Критическое сдвигающее усилие $\tau$ , кПа	Порог ползучести $\tau_{lim}$ , кПа	Скорость проведения испытаний $v$ , см/с
Обход с. Порумбрей	18	12,5	1*	0,07	100	2,63	17,8	114	98	$8,3 \cdot 10^{-6}$
				0,04	200	2,23	7,2	180	165	
				0,01	300	2,85	7,0	140	126	
	19	5,7	2*	-0,08	100	1,60	840	150	130	$5,3 \cdot 10^{-6}$
				0,40	100	1,25	624	63	21	
				0,20	100		816	70	53	
	18	9,4	3*	0,30	100	1,3	672	71,5		$5,3 \cdot 10^{-8}$
	24	12,5		<0	200	2,09	1080	142,5		$5,3 \cdot 10^{-8}$
	14	12,3		0,30	100	6,28	864	92,5		$1,9 \cdot 10^{-7}$
	24	12,5		<0	100	2,00	1032	130		$5,3 \cdot 10^{-8}$
	12	12,0		0,35	100	3,40	1488	72,5		$6,4 \cdot 10^{-8}$

1\* – Глина пылеватая пестроцветная;

2\* – Глина серовато-зелёная монолитная без зеркал скольжения;

3\* – Глина серовато-зелёная с округлыми включениями без признаков ожелезнения с зеркалами скольжения.

Испытаниям со скоростью  $v = 8,3 \cdot 10^{-6}$  см/с были подвергнуты образцы пылеватой пестро-цветной глины без видимых зеркал скольжения. Консистенция для большинства монолитов полутвёрдая:  $I_L = 0,01 - 0,07$ .

Как видно из табл.1 критическое сдвигающее усилие характеризуется высокими значениями. Это, на наш взгляд, свидетельствует о том, что при попадании в формирующуюся зону сдвига пылеватых частиц не происходит резкого снижения прочности в процессе развития деформации, а при достижении её критического значения происходит резкий скол.

Опыты со скоростью  $v = 5,3 \cdot 10^{-6}$  см/с проводились на образцах серовато-зелёных монолитных глин без зеркал скольжения. Испытывались образцы естественной структуры, а также доувлажнённые в ящиках с мокрым песком. Это позволило расширить диапазон изменения консистенции испытуемых образцов грунта от твёрдой до туго-пластичной и проследить намечающийся характер изменения длительной прочности от показателя текучести.



Применительно к имеющимся опытам, используя также данные испытаний на быстрый сдвиг, были построены зависимости вида  $S=f(v)$ . Несмотря на естественный при испытаниях грунтов такого сложения разброс опытных значений, прослеживается зависимость снижения прочности грунта с уменьшением скорости сдвига. Для образцов, отобранных из коренной толщи, испытанных при давлении 100 и 300 кПа при изменении скорости с  $v = a \cdot 10^{-3}$  см/с до  $v = a \cdot 10^{-8}$  см/с прочность уменьшилась, соответственно, на 25 %: от 165 до 125 кПа при вертикальном давлении  $p = 100$  кПа и на 23 %: от 225 до 175 кПа при  $p = 300$  кПа.

Возможное снижение сцепления во времени отражено на рис. 7.

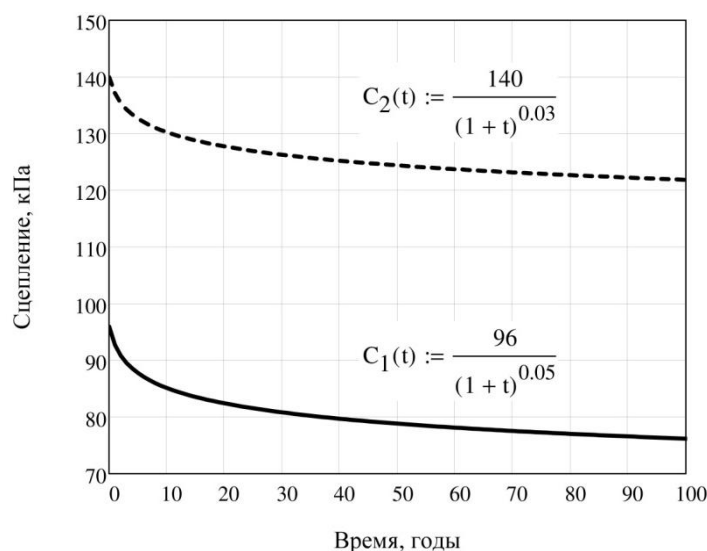


Рис. 7. Снижение сцепления во времени.

$C_1(t)$  – для глины пестроцветной комковатой;

$C_2(t)$  – для глины серовато-зелёной монолитной без зеркал скольжения.

### Выводы

Уменьшение прочности в процессе снижения скорости деформирования лишний раз подчеркивает неопределённость формулировки понятия стандартной прочности грунта и, особенно, когда речь идёт об изучении прочности грунтов, неоднократно испытавших какую-то начальную деформацию, вызванную формированием склонов.

Выяснение механизма снижения прочности грунтов во времени под действием постоянно действующих касательных напряжений требует проведения дополнительных исследований. Ещё раз напомним, что единства мнений по этому вопросу нет. Безусловно, что производственники лишены возможности проведения сложных, длительных и дорогостоящих экспериментов. Это означает, что для выбора надёжных значений параметров длительной прочности необходимо разработать методику, которая позволит устанавливать “служебную прочность” с достаточной степенью достоверности.

### Литература

1. Гольдштейн М.Н., Бабицкая С.С. Методика определения длительной прочности грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1959. – № 4. – с.11–14.
2. Гольдштейн М.Н., Туровская А.Я., Черненко Н.Б. О длительной прочности глинистого грунта в массиве на оползневых склонах // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1978. – № 5, с.16–19.
3. Исследования сопротивляемости сдвигу в зависимости от скорости деформации: Отчёт о НИР (заключительный) / Днепропетровский институт инженеров транспорта / Руководитель: М.Н. Гольдштейн. – Днепропетровск, 1962, 32 с.
4. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними). – М.: Стройиздат, 1977, 320 с.
5. Осипов В.Н. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. – М.: Издательство московского университета, 1979, 232с.
6. Тимофеева Т.А., Полканов В.Н. Методы определения реологических свойств оползневых накоплений. – Кишинёв, КПИ им. С. Лазо: Деп. В ВИНТИ. – №5, 1990, 26 с.
7. Ляшенко П.А. Природа сцепления и внутреннего трения глинистых грунтов // Геотехника Беларуси: Наука и Практика / Материалы международной научно-технической конференции. - Минск: БНТУ, 2013, 282-288
8. Полканов В.Н., Тимофеева Т.А., Иким Н.Г. К вопросу о методике определения длительной прочности неогеновых глин Молдовы при оценке устойчивости склонов и откосов // Труды Международной НТК: Проблемы строительного комплексов – Брянск, 1998, 16–19 ноября 1998, с. 371–374.
9. Тимофеева Т.А., Полканов В.Н. Исследование длительной прочности сарматских глин Молдовы // Известия ВУЗов: Строительство. – 1992. – №7, 8, с. 145–147.

*Primit la redacție – 30 iunie 2016*