

Черныш А.С., канд. техн. наук, проф.,  
Долженков Д.Ю., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ

[gkadastr@mail.ru](mailto:gkadastr@mail.ru)

С целью оценки длительной прочности водонасыщенных лессовых грунтов проводились длительные опыты в срезных приборах, на образцах лессового грунта в условиях полного водонасыщения. Для исключения влияния посторонних факторов опыты проводились с постоянной влажностью. Образцы испытывались при различных уплотняющих нагрузках. На основе результатов испытываемых образцов были выявлены определенные закономерности. При различных нагрузках определенные, значения сдвигающих усилий при разрушение грунта ведут к горизонтальным деформациям, которые в свою очередь незначительно расходятся по величинам. Были подтверждены известные в литературе представления. По экспериментальным данным построены кривые длительной прочности водонасыщенного грунта. Так же по результатам испытаний построен график изменения прочностных параметров водонасыщенного лессового грунт во времени. Установлено длительное значение силы сцепления и значение длительной прочности.

**Ключевые слова:** лессовые просадочные грунты, длительная прочность, длительное значение силы сцепления, сдвигающие усилие.

**Введение.** При некоторых соотношениях сдвигающих и уплотняющих усилий испытывают длительные деформации ползучести, приводящие в ряде случаев к снижению прочности грунтов. Возникает необходимость установить изменения прочности водонасыщенного лессового грунта в основаниях сооружений с течением длительного периода времени.

Изучение данного вопроса посвящен ряд работ [5, 6, 8, 9], в которых дается оценка величины длительной прочности лессового просадочного грунта с позиций нахождения количественной зависимости последней в виде некоторой доли от стандартной прочности на сдвиг. Однако, это положение не дает возможность вскрыть физическую сущность

процесса падения прочности грунтов во времени и не может носить общего характера.

Нами была поставлена задача изучения длительной прочности водонасыщенных лессовых грунтов в основаниях сооружений на базе результатов лабораторных экспериментальных исследований.

С этой целью в лабораторных условиях проводились длительные опыты в срезных приборах, на образцах лессового грунта ненарушенного сложения в условиях его водонасыщения.

Испытанию подвергались лессовые просадочные грунты, физические показатели которых приводятся в табл. 1.

Методика обработки результатов испытаний принимались в соответствии с работой [3].

Таблица 1

Физические показатели грунтов

Наименование показателей	Единица измерения	Величина показателя
1	2	3
Влажность	%	8,7
Предел текучести	%	30,4
Предел раскатывания	%	19,8
Число пластичности	%	10,6
Объемный вес	гс/см <sup>3</sup>	1,63
Объемный вес скелета	гс/см <sup>3</sup>	1,49
Удельный вес	гс/см <sup>3</sup>	2,71
Пористость	%	41,9
Коэффициент пористости		0,81
Степень влажности		0,296
Коэффициент консистенции		-1,06
Гранулометрический состав	%	
>0,05	%	19
0,05–0,005	%	64
<0,005	%	17

Для исключения из результатов опытов возможного влияния упрочнения грунта в связи с постепенным уменьшением его влажности

$W$ , опыты проводились методом «под водой», т.е. при соблюдении в течение всего опыта условия  $W = W_n = \text{const}$ .

Методика опыта заключалась в следующем. Образцы грунта помещались в срезной прибор и уплотнялись под вертикальной нагрузкой величиной  $1 \text{ кгс/см}^2$  до стабилизации осадки, после чего замачивались под этой нагрузкой. После стабилизации просадочной деформации образцы грунта подвергались испытаниям на срез при том же значении  $P = 1 \text{ кгс/см}^2$  и при различных, но постоянных для данного образца сдвигающих нагрузках.

При этом на первый образец прикладывалась наибольшая нагрузка, которая вызывала мгновенные разрушения. На следующие образцы прикладывались меньшие нагрузки, составляющие долю от максимальной, мгновенной. В зависимости от величины сдвигающих нагрузок образцы грунта срезались и различное время. При значениях действующих сдвигающих нагрузок меньших предела длительной прочности, срез не происходил.

На основе полученных результатов строились графики зависимости горизонтальных деформаций от периодов времени, затраченных на срез (с уплотняющими нагрузками  $1, 2$  и  $3 \text{ кгс/см}^2$ ), на основе которых строились кривые затухающей и незатухающей ползучести при сдвиге. При нагрузках меньше предела длительной прочности, незатухающая ползучесть не развивается, а деформация ползучести имеет затухающий характер. При нагрузках больше предела длительной прочности, процесс ползучести включал в себя стадии затухающей ползучести, стационарного течения и прогрессирующего деформирования. Установлено, что при больших значениях сдвигающих усилий срез происходил при небольших значениях горизонтальных деформаций. Например, при значении сдвигающего усилия, равном  $0,65 \text{ кгс/см}^2$ , под уплотняющей нагрузкой величиной  $1 \text{ кгс/см}^2$  полное разрушение (срез) образца произошло через  $4,5$  минуты, а соответствующая горизонтальная деформация в момент разрушения, фиксируемые по индикатору, оказалась равной  $3,15$  мм. При значении же сдвигающего усилия, равном  $0,53 \text{ кгс/см}^2$ , разрушение образца наступило через  $42$  суток, при деформации сдвига, равной  $4,21$  мм. При сдвигающих усилиях, равных  $0,5 \text{ кгс/см}^2$ , разрушение образца не наблюдалось,

деформация ползучести затухала. Очевидно предел длительной прочности испытанного образца под уплотняющей нагрузкой величиной  $1 \text{ кгс/см}^2$  равен примерно  $0,53 \text{ кгс/см}^2$ .

Под уплотняющим давлением  $2 \text{ кгс/см}^2$ , при сдвигающей нагрузке, равной  $\tau = 1,07 \text{ кгс/см}^2$ , полное разрушение образца произошло через  $7,5$  минут, а деформация сдвига к моменту разрушения составляла  $3,78$  мм.

При сдвигающей нагрузке  $\tau = 0,84 \text{ кгс/см}^2$ , разрушение образца наступило через  $59$  сут, а соответствующая деформация сдвига была равна  $4,47$  мм. При сдвигающей нагрузке  $\tau = 0,82 \text{ кгс/см}^2$ , разрушение образца (срез) не отмечалось. Очевидно, это значение сдвигающего усилия было меньше предела длительной прочности.

Под уплотняющей нагрузкой, равной  $3,0 \text{ кгс/см}^2$  при сдвигающем усилии  $1,45 \text{ кгс/см}^2$  образец грунта разрушился через  $3$  минуты, при значениях горизонтальных деформаций

$\delta_{np} = 4,64$  мм. А при сдвигающей нагрузке

$\tau = 1,17 \text{ кгс/см}^2$ , полное разрушение образца произошло через  $120$  суток и соответствующая горизонтальная деформация к этому моменту была равна  $\delta_{np} = 5,38$  мм.

Исходя из результатов указанных в лабораторных экспериментальных исследованиях, можно сделать выводы о том, предельные горизонтальные деформации грунта

при сдвиге  $\delta_{пред}$ , при котором наступает полное разрушение грунта, расходятся по величине в пределах  $13 \dots 19 \%$ , в зависимости от значений сдвигающих нагрузок. Однако в

порядке приближения величину  $\delta_{np}$  можно принять постоянной, как это и делается рядом исследователей. Это хорошо увязывается с известным в литературе представлением [2] о том, что разрушение грунта наступает тогда, когда развитие микротрещины достигает некоторого постоянного для данного вида грунта значения.

Установили закономерности изменения сопротивления сдвигу водонасыщенного лессового грунта во времени при трех значениях действующих уплотняющих давлений. Построенные кривые длительной прочности водонасыщенного лессового грунта (рис. 1) показывают, что сопротивление сдвигу с течением времени уменьшается и приближается к своему «длительно-предельному», для данного состояния грунта, значению. В наших опытах

предел длительной прочности  $\tau_{\infty}$  составляет в среднем 73...76 % от условно-мгновенной прочности, т.е.  $\tau_{\infty} = (0,73...0,76) \tau_0$ . При этом основное снижение прочности водонасыщенного лессового грунта происходит в течение 1 часа. Соответствующая этому времени разрушающая нагрузка составляет 79–82 % от условно-мгновенной прочности. В дальнейшем прочность уменьшается незначительно и медленно ( $\dot{\epsilon}$  5...6 %). Если выразить длительную прочность грунта как некоторую долю от его прочности, соответствующей одному часу, будем иметь

$$\tau_{\infty} = (0,92 \div 0,93)_{t=1 \text{ час}}$$

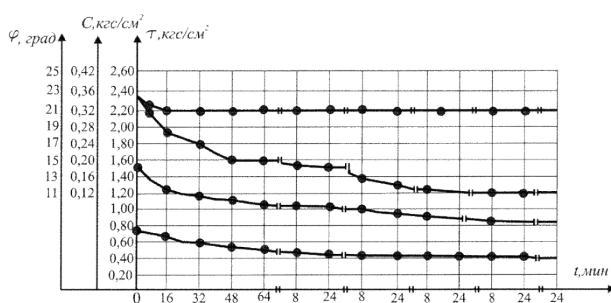


Рис. 1. Кривые длительной прочности и изменения прочностных параметров водонасыщенного лессового грунта во времени

Из графиков на рис. 1 определяем значения сопротивления грунтов сдвигу при различных периодах времени, на основе которых строим графики зависимости между уплотняющими и сдвигающими усилиями в различный период времени. Предельная прямая в зависимости от времени, занимая ряд положений, определяет значения прочностных параметров водонасыщенного лессового грунта в различные периоды времени.

На рис. 1 построен также график изменения прочностных параметров водонасыщенного лессового грунта во времени. Как видно из рис.1, сила сцепления водонасыщенного лессового грунта снижается во времени (45,2 %), а угол внутреннего трения уменьшается (10,9 %) только в начальный период времени ( $t \dot{\epsilon}$  4 мин) и в дальнейшем почти не меняется.

Поэтому при решении практических задач можно пренебречь этими изменениями и принять, что угол внутреннего трения не снижается во времени.

Таким образом, устанавливаем, что снижение прочности водонасыщенных лессовых грунтов во времени происходит в основном за счет уменьшения сил сцепления. В этом плане наше представление хорошо согласуется с мнениями авторов [1, 4, 7–9] о том, что

снижение прочности происходит лишь только за счет уменьшения сил сцепления, а угол внутреннего трения практически не меняется.

Длительное значение силы сцепления  $C_{\infty}$  водонасыщенных лессовых грунтов приблизительно составляет  $0,55C_0$  – сила сцепления, соответствующая условно-мгновенной прочности грунта.

Из рис. 1 видно, что основное снижение сил сцепления происходит в течение 1 часа. Соответствующая этому времени величина силы сцепления соответствует  $0,71C_0$  ( $C_{t=1 \text{ час}} = 0,71C_0$ ). Поэтому при определении длительного значения сил сцепления водонасыщенных лессовых грунтов целесообразно оценить его в виде некоторой доли, соответствующей одному часу.

Так, например, установлено, что длительное значение силы сцепления  $C_{\infty}$  составляет  $0,80C_{t=1 \text{ час}} \cdot C_{\infty} = 0,8C_{t=1 \text{ час}}$ .

Изложенное позволяет описать прочность водонасыщенных лессовых грунтов во времени в следующем виде:

$$\tau(t) = \sigma \cdot \text{tg} \phi + C(t).$$

Исходя из результатов наших опытов, длительную прочность можно определить выражением:

$$\tau_{\infty} = \sigma \cdot \text{tg} \phi + 0,8C_{t=1 \text{ час}}.$$

Последнее заключение относится исключительно к лессовым грунтам в водонасыщенном состоянии. Длительная же прочность неводонасыщенных лессовых грунтов нуждается в дальнейших исследованиях.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вялов С.С. и др. Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 1966.
2. Вялов С.С., Пекарская Н.А., Максимяк Р.В. О физической сущности процессов деформирования и разрушения глинистых грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1970. №1.
3. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. М.: Стандартинформ, 2013.
4. Маслов Н.Н. Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве. М.: Стройиздат, 1965.
5. Могилевская С.Е. Вопросы длительной прочности и деформируемости лессовых

грунтов как основанию гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ. Т. 64. 1960.

6. Могилевская С.Е. К вопросу ползучести лессовых грунтов // Известия ВНИИГ. Т. 62. 1959.

7. Куликов Г.В. Расчет и проектирование фундаментов сооружений на лессовых грунтах в ТССР. Ашхабад: Изд-во Минвуза ТССР, 1984.

8. Калачук Т.Г. К вопросу проектирования и строительства на слабых грунтах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 5. С. 120–124.

9. Калачук Т.Г., Юрьев А.Г., Карякин В.Ф., Выскребенцев В.С. О начальном давлении просадочных грунтов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 6. С. 24–28.

---

**Chernysh A.S., Dolzhenkov D.Y.**

**ASSESSMENT OF LONG-TERM STRENGTH OF SATURATED COLLAPSIBLE SOILS**

*For a goal assessment the long-term strength of saturated loess soils were conducted long experiments in shear devices. Conditions of specimens of loess soil were full water saturation. For exclusion the influence of extraneous factors, experiments were conducted with constant humidity. Specimens were tested at various sealing loads. Based on the results of the test Specimens were identified some of certain patterns. Determined at different loadings, the values of shearing forces at the ground lead to the destruction of the horizontal deformation, which in turn differ slightly from the values. It was confirmed with representation views in the known literature. From the experimental data were built long-term strength curves of saturated soil. As the test results plotted changes in strength parameters of water-saturated loess soil in time. As result explore value of long-term bonding strength and value of long-term strength.*

**Key words:** collapsible loess soil, long-term strength, long-term bonding strength, shearing strength.

---

**Черныш Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой городского кадастра и инженерных изысканий.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: [gkadastr@mail.ru](mailto:gkadastr@mail.ru)

**Долженков Дмитрий Юрьевич**, аспирант кафедры городского кадастра и инженерных изысканий.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: [dolzhenkov\\_dyu@energomash.ru](mailto:dolzhenkov_dyu@energomash.ru)