

Выскребенцев В.С., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЁССОВЫХ ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТОВ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

vovagjan@mail.ru

На основании статической обработки полученных результатов составлены таблицы для определения  $C_w$  и  $\varphi_w$  при интенсивности сейсмодействия (динамического) при  $J=7-8$  баллов и коэффициенте водонасыщения  $S_r \cong 0,8$ , при различных методах уплотнения грунтов.

**Ключевые слова:** просадочный грунт, угол внутреннего трения, плотность, прочность грунта, связность грунта, структурное сцепление, сейсмическое воздействие.

Прочностные свойства лёссовых просадочных грунтов характеризуются, как отмечалось рядом исследователей [1–5], двумя показателями: углом внутреннего трения « $\varphi$ » и сцепления « $C$ ». С повышением влажности просадочного грунта до полного водонасыщения с учётом динамических нагрузок сцепление снижается в 3–10 раз, а угол внутреннего трения в 1,1–1,4 раза. С повышением степени плотности сцепление и угол внутреннего трения возрастают.

Учитывая сложные гидрогеологические условия: сейсмичность района, постоянное динамическое воздействие на транспортные сооружения, а также возможность постоянной инфильтрации (по всей площади и локально), и практически ликвидации зоны аэрации под дорогами. При проектировании следует принимать в расчетах  $\varphi$  и  $C$  для грунтов при прогнозируемой фактической влажности, с учётом приложения динамических нагрузок [8, 9].

Установлено, что ослабление внутренних связей прогрессирует за счет гидродинамического противодействия, обусловленного динамическим напором (избыточным давлением), возникающим в толще грунта в процессе уплотнения нарушенных структур частиц. Все это позволяет оценивать величину сопротивляемости лёссовых грунтов при интенсивных динамических воздействиях следующим выражением:

$$S_{pw}^c = (P_H - \Delta_B \cdot h_t) \cdot \text{tg} \varphi_w + \sum_{w,t} + C_c \quad (1)$$

где  $P_H$  – нормативные напряжения от веса грунта, лежащего выше рассматриваемого горизонта, и веса сооружения;  $\Delta_B$  – объемный вес воды;  $h_t$  – динамический напор, отвечающий моменту времени  $t$ ;  $\varphi_w$  – угол внутреннего трения при влажности  $W$ ;  $\sum_{w,t}$  – связность грунта, имеющая водно-коллоидную

природу и отвечающая моменту времени  $t$ ;  $C_c$  – структурное сцепление, обязанное проявлению в грунтах цементации, спеканию и кристаллизации.

Как известно, сопротивляемость грунтов охарактеризована проф. Н.Н. Масловым [6, 7]. При  $t=0$  соответственно  $h_t=0$  и  $\sum_{w,t} = \sum_w$ , тогда данное выражение приобретает общеизвестный вид:

$$S_{pw} = P_H \text{tg} \varphi_w + \sum_w + C_c \quad (2)$$

Анализ многочисленных опытов с лёссовыми грунтами многих учёных, позволил установить характер изменения связанности грунта в начальные моменты приложения динамической нагрузки, близкой к зависимости

$$\sum_{w,t} = \sum_{w_k} + (\sum_{w_H} - \sum_{w_k})^{\mu t} \quad (3)$$

где  $\sum_{w_k}$ ,  $\sum_{w_H}$  – соответственно начальное и конечное значения связанности грунта;  $\mu$  – динамический параметр, характеризующий свойства грунта и силу динамического воздействия;  $t$  – длительность сотрясения. Формула (3) вполне сопоставляется с экспериментальными данными.

Исследования показывают, что в процессе нарушения структуры лёсса в любом горизонте водонасыщенной толщи динамический напор прогрессивно возрастает во времени, до своей максимально возможной величины, соответствующей заданному динамическому режиму при данной плотности и степени разрушения связанности, а затем относительно медленно падает.

Очевидно, возрастание динамического напора во времени на горизонте  $Z$  связываются с постепенным увеличением количества воды, освобождающейся во времени из объема грунта, охваченного сейсмическим воздействием. Для прогноза возрастающей величины динамического напора предложена формула

$$h_t = \frac{V_{\Pi}^2}{2k_{\phi}} L^2 t \quad (4)$$

где  $V_{\Pi}$  – коэффициент динамического уплотнения, свидетельствует о скорости уплотнения данного грунта при заданной динамической нагрузке;  $k_{\phi}$  – коэффициент фильтрации грунта;  $L$  – активная, переходящая в наружное состояние зона, определяемая по выражению:

$$L = \frac{\gamma_w / g T V \alpha_c - (P_0 t g \varphi_w + C_w)}{\gamma_w t g \varphi_w} \quad (5)$$

где  $\gamma_w$  – объемный вес грунта;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $T$  – период колебаний;  $V$  – скорость распространения сейсмических волн;  $\alpha_c$  – максимальное сейсмическое ускорение;  $P_0$  – нагрузка от веса сооружения;  $C_w$  – общее сцепление ( $C_w = \Sigma_w + C_c$ ).

В связи с ослаблением во времени прочности грунта, при сотрясении величина активной зоны, определяемой по формуле (5), будет иметь другое значение, и определяться с учетом изменения прочностных характеристик грунта:

$$L_t = \frac{\gamma_w / g T V \alpha_c - [(P_0 - \Delta_c h_t) t g \varphi_w + C_{w,t}]}{\gamma_w t g \varphi_w} \quad (6)$$

При решении задач, связанной с оценкой динамической (сейсмической) устойчивости грунтов наиболее важно установление критерия перехода их в динамически нарушенное состояние. Для этой цели предложена формула:

$$\alpha_{kp} = \frac{g(P_n t g \varphi_w + C_w)}{\gamma_w T V} \quad (7)$$

где  $\alpha_{kp}$  – критическое ускорение, при котором начинается нарушение структуры грунта, согласно предложения Х.З. Расулова [9].

Учитывая вышесказанное, основная задача заключалась в определении характера изменения связности грунта при изменении степени влажности и динамическом воздействии, точнее интенсивности и длительности ожидаемого сотрясения.

Изучались лёссовые просадочные грунты с пористостью от 36 до 50 %. Образцы отбирались в шурфах глубиной до 20 м (эти же образцы использовались для изучения просадочности).

При проведении экспериментов использовалась теория проф. Н.Н. Маслова – теория «плотности-влажности».

На основании статической обработки полученных результатов составлены (таблицы 1–4) для определения  $C_w$  и  $\varphi_w$  при интенсивности сейсмодействия (динамического) при  $J=7-8$  баллов и коэффициенте водонасыщения  $S_r \cong 0,8$ .

Учитывая, что на Юге Украины и Северного Кавказа и других регионов широкое распространение имеют среднеспадочные грунты с пористостью  $n=43-48$  %, обладающие низкими прочностными характеристиками и высокой деформационной способностью, возникает необходимость применения различных методов уплотнения грунтов.

Так же получены значения удельного сцепления  $C_w$ , МПа и угла внутреннего трения  $\varphi_w$ , град. лёссовых грунтов при  $S_r \geq 0,8$  при стабилизированном сдвиге с предварительным обжатием образцов, быстром сдвиге образцов грунта без предварительного обжатия, быстром сдвиге образцов грунта без предварительного обжатия и  $J=7-8$  баллов при  $W_p$  от 0,15 до 0,21 и коэффициенте пористости  $e=0,5-0,7$ .

Таблица 1

**Рекомендуемые значения удельного сцепления  $C_w$ , МПа и угла внутреннего трения  $\varphi_w$ , град. лёссов при  $S_r \cong 0,8$  (при стабилизированном сдвиге с предварительным обжатием образцов)**

$W_p$	показатели	Характеристики грунтов при коэффициенте пористости $e$						
		0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
0,13	$C_w$	0,014	0,011	0,008	0,007	0,06	0,05	0,04
	$\varphi_w$	24°50'	24°25'	24°	23°10'	22°35'	22°	21°20'
0,15	$C_w$	0,027	0,021	0,016	0,013	0,012	0,01	0,008
	$\varphi_w$	23°40'	23°25'	22°50'	22°25'	21°50'	21°20'	21°
0,17	$C_w$	0,036	0,033	0,029	0,024	0,02	0,017	0,015
	$\varphi_w$	22°45'	22°15'	21°45'	21°20'	20°45'	20°20'	19°40'
0,19	$C_w$		0,037	0,034	0,031	0,028	0,024	0,02
	$\varphi_w$		22°10'	21°35'	20°15'	19°45'	19°20'	18°50'
0,21	$C_w$				0,036	0,032	0,03	0,027
	$\varphi_w$				19°15'	18°40'	18°30'	18°
0,23	$C_w$						0,034	0,031
	$\varphi_w$						17°40'	17°25'

Продолжение таблицы 1

W <sub>p</sub>	показатели	Характеристики грунтов при коэффициенте пористости $e$				
		0,8	0,85	0,9	0,95	1,0
0,15	C <sub>w</sub>	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003
	φ <sub>w</sub>	20°25'	19°55'	19°30'	19°	18°40'
0,17	C <sub>w</sub>	0,014	0,013	0,011	0,01	0,009
	φ <sub>w</sub>	19°20'	18°55'	18°33'	18°05'	17°40'
0,19	C <sub>w</sub>	0,018	0,016	0,015	0,014	0,013
	φ <sub>w</sub>	18°25'	18°	17°40'	17°20'	17°
0,21	C <sub>w</sub>	0,024	0,020	0,019	0,017	0,016
	φ <sub>w</sub>	17°40'	17°20'	17°	16°20'	15°45'
0,23	C <sub>w</sub>	0,029	0,026	0,024	0,02	0,019
	φ <sub>w</sub>	17°	16°10'	15°40'	15°	14°20'

Таблица 2

Рекомендуемые значения удельного сцепления C<sub>w</sub>, МПа и угла внутреннего трения φ<sub>w</sub>, град. лессовых грунтов при S<sub>r</sub> ≥ 0,8 (при быстром сдвиге без предварительного обжатия образцов)

W <sub>p</sub>	показатели	Характеристики грунтов при коэффициенте пористости $e$						
		0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
0,13	C <sub>w</sub>	0,016	0,013	0,01	0,009	0,007	0,006	0,005
	φ <sub>w</sub>	23°40'	23°20'	23°	22°40'	22°10'	21°50'	21°30'
0,15	C <sub>w</sub>	0,03	0,024	0,019	0,016	0,014	0,012	0,01
	φ <sub>w</sub>	22°40'	22°15'	21°40'	21°15'	20°50'	20°20'	20°00'
0,17	C <sub>w</sub>	0,041	0,037	0,033	0,028	0,024	0,021	0,018
	φ <sub>w</sub>	21°15'	20°45'	20°15'	20°00'	19°25'	19°00'	18°30'
0,19	C <sub>w</sub>		0,043	0,039	0,036	0,033	0,028	0,024
	φ <sub>w</sub>		20°30'	20°00'	18°45'	18°15'	18°00'	17°30'
0,21	C <sub>w</sub>				0,042	0,037	0,035	0,032
	φ <sub>w</sub>				17°40'	17°25'	17°15'	17°00'
0,23	C <sub>w</sub>						0,042	0,038
	φ <sub>w</sub>						16°40'	16°30'
W <sub>p</sub>	показатели	Характеристики грунтов при коэффициенте пористости $e$						
		0,8	0,85	0,9	0,95	1,0		
0,15	C <sub>w</sub>	0,009	0,008	0,006	0,005	0,004		
	φ <sub>w</sub>	19°25'	18°55'	18°35'	18°00'	17°45'		
0,17	C <sub>w</sub>	0,017	0,016	0,013	0,012	0,011		
	φ <sub>w</sub>	18°00'	17°45'	17°20'	17°00'	16°40'		
0,19	C <sub>w</sub>	0,021	0,019	0,018	0,016	0,014		
	φ <sub>w</sub>	17°10'	16°50'	16°40'	16°30'	16°00'		
0,21	C <sub>w</sub>	0,028	0,024	0,022	0,019	0,017		
	φ <sub>w</sub>	16°40'	16°35'	16°10'	15°40'	15°00'		
0,23	C <sub>w</sub>	0,035	0,031	0,028	0,023	0,021		
	φ <sub>w</sub>	16°10'	15°20'	15°00'	14°20'	13°50'		

Для лёссовых грунтов, обладающих при замачивании просадочными свойствами, определенный интерес представляет величина обжимающего вертикального давления, увязанная с начальным давлением или порогом просадочности.

Для определения C и φ в начале давались уплотняющие нагрузки меньше, чем начальное давление просадочности, для серии образцов отобранных с глубины 2,0 м. Характеристики грунта были следующие: ρ<sub>d</sub>=1,60 г/см<sup>3</sup>; ε=0,939; W<sub>p</sub>=0,17; W<sub>L</sub>=0,30 относительная просадочность при p = 0,12 и 0,3 МПа составила

соответственно 0,014; 0,037 и 0,052. Часть водонасыщенных образцов грунта (серия 1) предварительно уплотнилась при давлениях: p = 0,02; 0,04; 0,06 МПа и испытания на срез проводились при этих же давлениях.

Для части водонасыщенных образцов грунта (серия 2) образцы предварительно уплотнялись при давлении p = 0,06 МПа, и затем производился их сдвиг при давлениях p = 0,02; 0,04; 0,06 МПа. А третья группа образцов (серии 3) грунта естественной влажности и в водонасыщенном состоянии, уплотнялись и срезались при давлениях p = 0,1; 0,2; 0,3 МПа. А

также ряд образцов (серии 4) при тех же значениях влажности предварительно уплотнялись при давлении  $p = 0,3$  МПа, и срезались при давлении  $p = 0,1; 0,2; 0,3$  МПа (табл. 5).

Таблица 3

**Рекомендуемые значения удельного сцепления  $C_w$ , МПа и угла внутреннего трения  $\varphi_w$ , град. лессовых грунтов при  $S_r = 0,8$  и интенсивности сейсмического воздействия  $J=7-8$  баллов**

$W_p$	показатели	Характеристики грунтов при коэффициенте пористости $e$				
		0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
0,15	$C_w$	0,016	0,013	0,011	0,009	0,007
	$\varphi_w$	24°30'	22°20'	21°30'	20°30'	20°10'
0,17	$C_w$	0,030	0,024	0,02	0,016	0,014
	$\varphi_w$	21°40'	21°30'	20°30'	20°10'	19°10'
0,19	$C_w$	0,034	0,031	0,027	0,023	0,018
	$\varphi_w$	20°40'	20°10'	19°40'	18°50'	18°15'
0,21	$C_w$		0,036	0,032	0,030	0,026
	$\varphi_w$		19°20'	18°40'	18°30'	17°40'
0,23	$C_w$				0,035	0,031
	$\varphi_w$				17°40'	17°15'

Таблица 4

**Рекомендуемые значения удельного сцепления  $C_w$ , МПа и угла внутреннего трения  $\varphi_w$ , град. лессовых грунтов при  $S_r \cong 0,8$   $J=7-8$  баллов (при стабилизированном сдвиге с предварительным обжатием образцов)**

$W_p$	показатели	Характеристики грунтов при коэффициенте пористости $e$				
		0,50	0,55	0,6	0,65	0,70
0,15	$C_w$	0,02	0,015	0,012	0,01	0,008
	$\varphi_w$	22°50'	22°00'	21°25'	20°50'	20°10'
0,17	$C_w$	0,031	0,027	0,02	0,016	0,012
	$\varphi_w$	21°20'	20°35'	20°10'	19°10'	18°30'
0,19	$C_w$	0,035	0,03	0,027	0,023	0,018
	$\varphi_w$	21°30'	21°00'	19°20'	18°20'	17°45'
0,21	$C_w$			0,031	0,027	0,023
	$\varphi_w$			18°20'	17°20'	17°00'

Таблица 5

**Обобщенные результаты сдвиговых испытаний лёссовидного суглинка**

серия	Начальное давление при		При влажности грунта			
	Уплотнения, МПа	Сдвиге, МПа	естественного		водонасыщенного	
			$C$ , МПа	$\varphi$ , град	$C$ , МПа	$\varphi$ , град
1	0,02;0,04;0,06	0,02;0,04;0,06	-	-	0,005	16
2	0,06	0,06;0,04;0,02	-	-	0,007	16
3	0,1;0,2;0,3	0,1;0,2;0,3	0,03	21	0,011	20
4	0,3	0,3;0,2;0,1	0,05	20	0,013	19

Из таблицы видно: образцы грунтов серии 1 и 3 имеют более низкие значения удельного сцепления  $C$  и несколько более высокие  $\varphi$  по сравнению с результатами, полученными при испытании по методике с предварительным уплотнением грунта (серий 2 и 4). В известной мере это объясняется тем, что плотность переуплотненных образцов при конечных вертикальных давлениях  $p = 0,06$  и  $0,3$  МПа будет больше, чем при давлениях уплотнения  $p = 0,02; 0,04; 0,1$  и  $0,2$  МПа, при которых осуществляется срез в опытах серии 1 и 3. При

оценке прочности лессовых грунтов в зависимости от продолжительности замачивания наблюдается различное сопротивление их сдвигу.

В процессе проявления просадочной деформации прочность грунта резко падает, так как вначале замачивания наиболее интенсивно происходит размягчение цементационных связей. После проявления просадочной деформации, сопровождающейся уплотнением грунта, проявлением дополнительны контактов

между частицами и формированием новой структуры прочность её несколько возрастает.

Вывод: лёссовые грунты, в отличие от обычных глинистых непросадочных грунтов требуют особого подхода при оценке их прочности. На значение параметров прочности лёссовых грунтов сказываются методы подготовки образцов грунта к испытаниям, продолжительность из замачивания, скорость сдвига и другие факторы. Поэтому предлагается оценку прочности грунтов необходимо производить по той методике, которая в наибольшей мере соответствует реальным условиям работы грунтового основания сооружения. Это общая задача и инженера-геолога и инженера-проектировщика.

Использование предложенных рекомендаций по предлагаемым значениям  $C_w$  и  $\varphi_w$ , позволяет более точно оценивать несущую способность основания в условиях высокой сейсмичности и динамического воздействия, более надежно проектировать основания и повысить экономическую эффективность.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гильман Я.Д., Смирнов И.И. О показателях прочности лёссовых грунтов в Ростовской области. «Информационный бюллетень» ЦТИСИЗа, вып. (19). М., 1972.

2. Денисов Н. Я. Строительные свойства лёсса и лёссовидных суглинков. М.: Госстройиздат, 1953. 154 с.

3. Крутов В.И. Расчет фундаментов на просадочных грунтах. М.: Стройиздат, 1972. 176 с.

4. Крутов В.И. Основания и фундаменты на просадочных грунтах. Киев, «Будівельник», 1982. 220 с.

5. Куликов Г.В. Прочностные свойства просадочных грунтов Прикопетдагской равнины. Сб. «Строительство и строительные материалы Туркмении». Изд-во ТГУ, Ашхабад, 1976 г.

5. Черныш А.С. К вопросу оценки устойчивости откосов сложенных просадочными грунтами при динамических воздействиях и увлажнении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №6. С. 27–29.

6. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. М.: Высш. школа, 1982. 511 с.

7. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства. М.: Стройиздат, 1977.

8. Расулов Х.З. Сейсмичность лёссовых оснований зданий и сооружений. Ташкент, изд-во «Узбекистан», 1977. 163 с.

9. Расулов Х.З. Оценка возможности нарушения устойчивости связных грунтов при землетрясениях. Материалы IV Всесоюзной конференции. Ташкент, изд-во «Фан», 1977.

Vyskrebentsev V.S.

#### STRUCTURAL BEHAVIOUR OF LOESS SUBSIDING SOILS UNDER PERMANENT AND DYNAMIC LOAD

*On the basis of static handling of attained results we composed table for determining  $C_w$  и  $\varphi_w$  under intensity of earthquake action (dynamic) under  $J=7-8$  points and degree of saturation  $S_r \cong 0,8$ , under different means of soil stabilization.*

**Key words:** collapsible soil, drained angle of internal friction, density, soil strength, cohesive properties of soil, structural strength, earthquake action.

**Выскребенцев Владимир Сергеевич**, 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: vovagjan@mail.ru.