

Выскребенцев В.С., аспирант,  
Черныш А.С., канд. техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ОБ УПЛОТНЕНИИ СТРУКТУРНО-НЕУСТОЙЧИВЫХ ГРУНТОВ ТЯЖЕЛЫМИ ТРАМБОВКАМИ

vovagjan@mail.ru

В статье изложены результаты исследований по изучению характера деформаций просадочных грунтов в основании фундаментов. Рассмотрено уплотнение лёссовидной супеси по глубине тяжелыми трамбовками на исследуемом участке. Было установлено, что трамбование значительно уменьшило степень просадочности грунтов дна котлована, или полностью были утрачены просадочные свойства. Приводятся рекомендации в виде аналитических и табличных зависимостей: изменение коэффициентов относительной просадочности в основании котлованов; значение модуля общей деформации и расчетного давления; значение коэффициентов упругого равномерного сжатия; значение коэффициентов относительного сжатия.

**Ключевые слова:** глубина уплотнения, трамбование, оптимальная влажность, лёссовые грунты, степень просадочности.

На сегодняшний день уплотнения структурно-неустойчивых грунтов тяжелыми трамбовками дна котлована, путем свободного сбрасывания на уплотняемую площадь является самым актуальным способом. При ударе происходит превращение кинетической энергии падающего органа в энергию деформации. Эффективность применения данного метода многократно подтверждена многочисленными исследованиями и производственными испытаниями [1-10] на тысячах построенных и строящихся объектах в разных районах СНГ, ввиду простоты производства, экономичности, получения неплохого качества уплотнения.

В настоящее время широко применяются трамбовки с  $d=1,4-1,8$  м и весом 45-60 кН, обеспечивающие уплотнение просадочных лёссовых грунтов на глубину до 3-3,5 м. При массе трамбовки 100 кН и  $d=2,4$  м, глубина уплотнения достигает 5,5-6,0 м. Уже в 70-х годах масса трамбовки стала достигать до 200 кН, сбрасываемая с высоты 24 м. Глубина требуемых уплотнений достигла 40 м. В Англии трамбовки массой 500 кН, Швеции 600 кН, в Японии до 1500 кН.

Можно заключить, что глубина уплотнения зависит от массы трамбовки, высоты сбрасывания, количества ударов, а также вида, структурной прочности, плотности и влажности грунта.

Поверхностное уплотнение тяжелыми трамбовками применяется с целью:

- устранения просадочных свойств грунтов в пределах всей или части деформируемой зоны от нагрузки фундаментов;

- создание в основании сооружений сплошного маловодопроницаемого экрана, препятствующего интенсивному замачиванию нижележащих просадочных грунтов;

- повышения плотности, прочностных характеристик и снижения сжимаемости грунтов при последующем их водонасыщении.

На площадках с I типом грунтовых условий по просадочности при ширине фундаментов (до 1,5-2,0 м) поверхностное уплотнение обычно оказывается вполне достаточным до полной ликвидации просадочных свойств грунтов в пределах всей деформируемой зоны от нагрузки фундаментов.

На площадках со II типом грунтовых условий поверхностное уплотнение полностью или частично устраняет просадку грунта только от нагрузки фундаментов и применяется в комплексе с водозащитными и конструктивными мероприятиями.

Уплотняемость грунтов определяется по методике стандартного уплотнения – ГОСТ 22733-2002 [11].

Большое влияние на эффективность уплотнения оказывает влажность грунта. С увеличением влажности  $\rho_d$  возрастает, при достижении некоторого максимального значения снижается. Максимальная плотность уплотненного грунта представляет собой наибольшее значение  $\rho_d$ , достигаемое при принятых режимах методах и энергии уплотнения.

В общем виде расход воды на доувлажнение определяется по формуле:

$$A = \frac{\rho_d}{\gamma_w} (W_{\text{опт}} - W) h_{\text{упл}}, \quad (1)$$

где  $\rho_d$  – объемный вес скелета грунта,  $\text{кН/м}^3$ ;  $h_{\text{упл}}$  – мощность уплотняемого слоя, м;  $\gamma_w$  – удельный вес воды, равный  $10 \text{ кН/м}^3$ ;  $W$  – естественная влажность;  $W_{\text{опт}}$  – оптимальная влажность.

Оптимальную влажность (при отсутствии экспериментальных данных) рекомендуется

принимать равной  $W_{опт} = W_p - (0,01 - 0,03)$ , ( $W_p$  – влажность на границе раскатывания).

Уплотнение грунтов производится до определенной степени плотности выражаемой через коэффициент уплотнения  $K_{уп}$ , который равен:

$$K_{уп} = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}}, \quad (2)$$

Степень уплотнения и объемный вес скелета грунта по глубине уменьшается и целесообразно выделять зону распространения и уплотняемую зону грунта (рис.1). Зона распространения уплотнения представляет собой толщину грунта  $h'_{уп}$ , в пределах которой происходит повышение объемного веса его скелета, распространяется от уплотненной поверхности до глубины, на которой  $\rho_d$  повышается не менее чем на  $0,02 \text{ т/м}^3$  ( $0,2 \text{ кН/м}^3$ ).

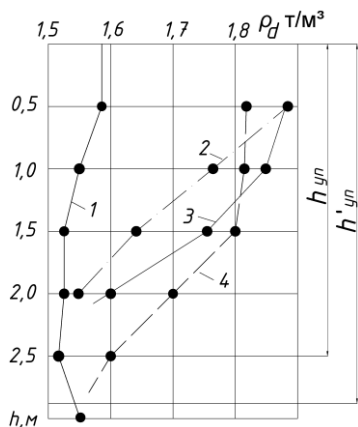


Рис. 1. График изменения объемного веса скелета грунта по глубине:

1 – до уплотнения; 2-4 – после уплотнения соответственно 8, 12 и 20 ударами трамбовки

За уплотненную зону  $h_{уп}$  принимают толщину грунта, в пределах которой  $\rho_d$  не ниже заданного или допустимого его минимального значения.

Понижение уплотненной поверхности представляет собой разность отметок её до и после и определяется по результатам опытных работ или вычисляется по формуле:

$$\Delta h = \left(1 - \frac{\rho'_d}{\rho_{dуп}}\right) h'_{уп} m_{уп}, \quad (3)$$

где  $\rho'_d$  – среднее значение объемного веса скелета грунта до уплотнения;  $\rho_{dуп}$  – среднее значение объемного веса скелета грунта в пределах зоны распространения  $h'_{уп}$ ;  $m_{уп}$  – коэффициент, учитывающий боковое расширение грунта в стороны и выпор его, принимаемый равным при уплотнении: в один след  $m_{уп}=1,2$ ; в два следа  $m_{уп}=1,1$ ; в три и более следов  $m_{уп}=1$ .

Величину понижения трамбуемой поверхности можно определить по формуле:

$$\Delta h = \left[ \frac{l_0 - l_{упл ср}}{1 + l_{сп}} \right] h_{упл}, \quad (4)$$

где  $l_0$  – коэффициент пористости грунта в природном залегании;  $l_{упл ср}$  – среднее значение коэффициента пористости грунта, уплотняемого трамбованием;

$$l_{упл ср} = \frac{l_{упл max} + l_{упл min}}{2}, \quad (5)$$

где  $l_{упл max}$  – коэффициент пористости грунта на границе слоя достаточно уплотненного грунта ( $\rho_d=16 \text{ кН/м}^3$ );  $h_{упл}$  – мощность уплотненного слоя, м.

Уплотнение грунта происходит за счет накопления остаточных деформаций при циклических нагрузках. Состояние грунта, при котором в процессе уплотнения практически не происходит повышение его степени плотности, называется уплотнением до отказа (рис.2). Величину отказа принимают  $0,5...2,0 \text{ см}$ , в зависимости от вида грунта. С увеличением удельной энергии  $\rho_{d max}$  возрастает. Ударная нагрузка по принятому методу стандартного уплотнения соответствует статической нагрузке  $0,8-1,0 \text{ МПа}$ .

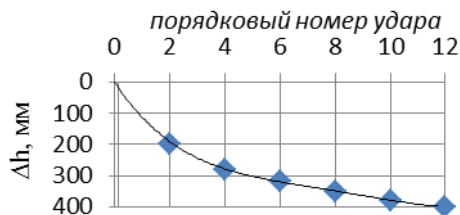


Рис. 2. График понижения требуемой поверхности в зависимости от числа ударов

С увеличением диаметра трамбовки в 2 раза (с 1,2-до 2,4 м) происходит повышение глубины уплотнения в 2,75 раза, т.е. до 5,5 м (рис. 3).

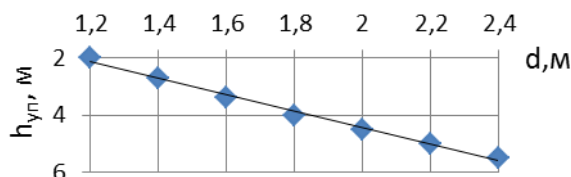


Рис. 3. График зависимости глубины от диаметра трамбовки

Снижение влажности ниже оптимальной на  $0,04-0,05$  в лессовых грунтах приводит к уменьшению глубины уплотнения на 20-25%.

При уплотнении грунтов часть энергии переходит в упругие колебания грунта (колебания распространяются на 15-30 м, с уменьшением амплитуды колебаний). Приблизительно можно принять, что при энергии удара  $30-40 \text{ т/м}$  сейсмичность в баллах распространяется на расстояние: 8 баллов – 3,5-

4 м; 7 баллов – 5-7 м и 6 баллов – 9-10 м. Уплотнение тяжелыми трамбовками следует производить на расстоянии от наружных стен, равном  $0,8 \dots 1,0$  диаметр трамбуемой плиты.

Рассмотрим поверхностное уплотнение грунтов тяжелыми трамбовками на исследуемом

участке. Грунты участка в сжимаемой зоне представлены лессовидными супесями. Общая просадочная толща составляла 9,0 м. Физико-механические свойства участка представлены в (табл. 1).

Таблица 1

### Физико-механические свойства лессового грунта исследуемого участка

Объемный вес $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	Удельный вес $\gamma_s$ , кН/м <sup>3</sup>	Естественная влажность $W$	Пористость $n$ , %	Объемный вес скелета грунта $\rho_d$ , кН/м <sup>3</sup>	Влажность на пределе раскатывания $W_p$	Относительная просадочность	
						при природной нагрузке	при $P=0,2-0,3$ МПа
14,7-15,6	26,6-26,8	0,058-0,104	43,2-46,4	15,35-14,55	0,16-0,21	0,0045-0,0095	0,039-0,065

Гранулометрический состав грунтов характеризуется содержанием глинистых фракций от 4,8 до 10,2 %, пылеватых от 50,5 до 64,8 % и песчаных от 14 до 38 %. Согласно расчетов, общая величина просадки деформируемой зоны при  $P=0,2$  МПа составила 21,5 см. Уплотнение грунтов проводилось на участке в 6-ти опытных котлованах с размерами в плане 3,5x4,5 м и до 8,5x20,5 м. Диаметр трамбовки принимался равным 1,5 м, вес трамбовки 45 кН.

Расчетами для исследуемого участка установлено, что при  $d=1,5$  м;  $h=2,1$  м;  $\Delta h=0,21$  м;  $Q=0,34$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> при  $W_o=0,204$ . В связи с тем, что уплотнение проводилось в засушливый (жаркий) период и в котлованах с ограниченными размерами, была поставлена задача определения

оптимального расхода воды на доувлажнение. Расход воды на доувлажнение грунта в 1, 2 и 3 котловане (соответственно при 8, 10 и 12 ударах) принят  $Q_1=0,34$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> при  $W_o=W_p+0,02$ , а для 4, 5 и 6 котлованов  $Q_2=0,40$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> при  $W_o=W_p+0,04$ .

Изменение влажности по глубине приводится в (табл. 2). Изучение расхода воды на увлажнение расчетной уплотняемой толщи и его потерь для котлована №6 показал, что верхние 20-30 см увлажнены  $W=0,215-0,19$ . Расход воды в процентном отношении от общего количества составил: на уплотняемую толщу – 77%, увлажнение грунта в стороны от уплотняемой толщи – 16%, увлажнение грунта под расчетной толщей – 4%, на испарение – 3 %.

Таблица 2

### Распределение влажности в основании котлованов

Уплотненная толща по глубине от дна котлована, м	Влажность					
	Дополнительное увлажнение $Q_1$			Дополнительное увлажнение $Q_2$		
	1 котлован	2 котлован	3 котлован	4 котлован	5 котлован	6 котлован
0,2-0,3	0,188	0,190	0,191	0,189	0,193	0,196
0,5	0,179	0,183	0,184	0,182	0,181	0,185
1,0	0,169	0,168	0,170	0,173	0,177	0,178
1,5	0,132	0,135	0,138	0,160	0,159	0,167
2,0	0,103	0,107	0,111	0,146	0,148	0,157
2,5	0,101	0,096	0,104	0,108	0,115	0,120

Полный цикл на увлажнение и подсушку верхнего слоя составил 6-8 дней. Трамбовка сбрасывалась с высоты 4,0 м. После окончания трамбования в котлованах закладывались шур-

фы, из которых отбирались образцы грунта через 0,2-0,5 м для лабораторных исследований. Результаты компрессионных испытаний приводятся в (табл. 3).

Таблица 3

### Изменение коэффициентов относительной просадочности в основании котлованов

Слои уплотняемой толщи по глубине от дна котлована, м	Коэффициент относительной просадочности при $P=0,2$ МПа						
	До уплотнения	После уплотнения					
		1-ый котлован	2-ый котлован	3-ый котлован	4-ый котлован	5-ый котлован	6-ый котлован
0-0,5	0,063	0,0038	0,0027	0,0018	0,0018	0,0011	0,0011
0,5-1,0	0,067	0,0097	0,0083	0,0062	0,0070	0,0053	0,0041
1,0-1,5	0,058	0,0110	0,0092	0,0077	0,0097	0,0069	0,0058
1,5-2,0	0,050	0,0460	0,0280	0,0180	0,0180	0,0110	0,0079
2,0-2,5	0,047	0,0470	0,0470	0,0470	0,0470	0,0380	0,0110
2,5-3,0	0,046	0,0490	0,0470	0,0470	0,0470	0,0400	0,0280

Исследованиями установлено, что в 6-ом котловане трамбование, значительно уменьшило степень просадочности до глубины 3 м от дна котлована, и полностью утрачены просадочные свойства до 2,42 м. В третьем котловане при том же количестве ударов грунты утратили свои просадочные свойства только до 1,69 м. Меньшая глубина уплотнения в 3-ем котловане по сравнению с 6-ым (при одинаковом количестве ударов) объясняется тем, что в уплотняемой толще влажность была недостаточной. Количество воды на доувлажнение основания 3-го котлована определялась по СП 45.13330.2012 [12], без учета региональных особенностей. Максимальное уплотнение достигается при влажности примерно на пределе раскатывания ( $S_r \approx 0,6$ ) при 12 ударах. Максимальная прочность грунта на раздавливание, равная 0,46 МПа, наблюдается в образце с  $W = 0,14-0,15$ , а при  $W = W_p$  достигает 0,40 МПа. Общая величина возможной просадки, равная до уплотнения 21 см снижена поверхностным трамбованием до 2 см.

График уплотнения лессовидной супеси по глубине при различном количестве ударов представлен на (рис. 4.)

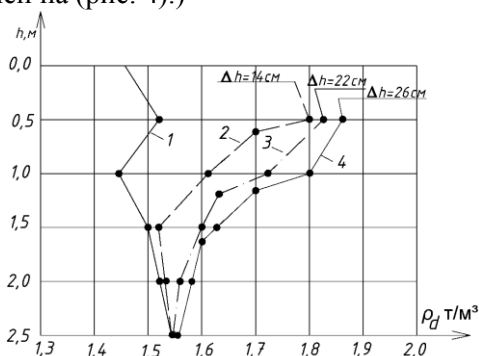


Рис. 4. Уплотнение лессовидной супеси трамбовкой при  $Q=0,34 \text{ м}^3/\text{м}^2$

- 1 – до уплотнения; 2 – при 8 ударах;
- 3 – при 10 ударах; 4 – при 12 ударах

Количество воды на доувлажнение грунтов следует определять по зависимости:

$$Q = \frac{m \rho_d (W_o - W_{cp})}{\rho_w} h_{y_{вл}}, \quad (6)$$

где  $\rho_d$  – плотность грунта в сухом состоянии,  $\text{кН}/\text{м}^3$ ;  $W_o$  – оптимальная влажность грунтов,

подготовленных для уплотнения:  $W_o = 0,175-0,185$  – для суглинков;  $W_o = 0,155-0,16$  – для супесей;  $\rho_w = 10 \text{ кН}/\text{м}^3$ ;  $W_{cp}$  – средняя влажность грунтов до уплотнения;  $h_{y_{вл}}$  – следует принимать равной  $2d_{mp}$ ;  $m$  – коэффициент, учитывающий грунтовые условия и должен быть не менее: при трамбовании супесчаных грунтов в летний период под фундаментами площадью  $A \leq 12,0 \text{ м}^2$  –  $m=1,2$ , а при  $A \geq 100 \text{ м}^2$  –  $m_2 = 1,1$ , в засушливый осенний период, соответственно –  $m=1,15$  и  $m_2=1,05$ ; для суглинистых грунтов в летний период  $m=1,3$  и  $m_2=1,15$ ; в засушливый осенний период  $m=1,2$  и  $m_2=1,1$ .

Возможная глубина уплотнения тяжелыми трамбовками (где практически полностью устранены просадочные свойства грунтов), при оптимальной влажности, принимается равной:

$$h_{yn} = k d_{mp}, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, принимаемый равным по данным производственных испытаний: для супесей –  $k = 1,75-1,8$  и для суглинков –  $k = 1,6-1,65$ .

Предварительное распределение плотности по глубине можно определить по следующим зависимостям:  $\rho_d = 1,8-0,09Z$  при  $d_{mp} = 1,5 \text{ м}$ ;  $\rho_d = 1,8-0,12Z$  при  $d_{mp} = 1,2 \text{ м}$ ;  $\rho_d = 1,8-0,14Z$  при  $d_{mp} = 1,0 \text{ м}$ . Величина  $Z$  – в м, а вычислительное значение  $\rho_d$  – в  $\text{кН}/\text{м}^3$ .

На основании лабораторных испытаний образцов отобранных в шурфах после уплотнения, зависимость расчетного сопротивления от плотности грунта, можно аппроксимировать уравнением вида (при оптимальной влажности):

$$R = 0,7 + 7,2(\rho_d - 1,4), \text{ кгс}/\text{см}^2 \quad (8)$$

$$R = 0,07 + 0,072(\rho_d - 14), \text{ МПа}$$

Полученные значения  $R$  можно использовать для предварительных расчетов, с уточнением производственными испытаниями. Значение модуля общей деформации  $E_0$  и расчетное давление  $R$  приведены в (табл. 4), полученные с помощью стандартных штамповых испытаний ( $d = 79,8 \text{ см}$  при  $A = 5000 \text{ см}^2 = 0,5 \text{ м}^2$ ).

Таблица 4

**Значение модуля общей деформации и расчетного давления**

Плотность скелета грунта $\rho_d \text{ кН}/\text{м}^3$	Модуль общей деформации $E_0$ МПа				Расчетное давление $R$ , МПа	
	суглинки		супеси		$S_r=0,6-0,7$	$S_r=0,8-0,9$
	$S_r=0,6-0,7$	$S_r=0,8-0,9$	$S_r=0,6-0,7$	$S_r=0,8-0,9$		
17,5	21,0	17,0	17,0	14,5	0,32	0,28
17,0	18,0	14,0	14,0	12,0	0,28	0,25
16,7	16,0	12,5	12,0	10,5	0,26	0,23
16,2	13,0	10,5	10,0	9,0	0,23	0,21
15,7	10,0	9,0	8,0	7,5	0,20	0,18
15,4	7,5	6,5	6,5	6,0	0,17	0,155

Таблица 5

## Значение коэффициентов упругого равномерного сжатия

Степень влажности $S_r$	$C_z$ , кгс/м <sup>3</sup> при $\rho_d$ кН/м <sup>3</sup>							
	17,5		17,0		16,5		16,0	
	Нагрузка, МПа							
	0,15	0,2	0,15	0,2	0,15	0,2	0,15	0,2
0,6	5,5	5,1	4,9	4,35	4,4	4,1	3,8	3,6
0,8	5,0	4,7	4,4	4,15	4,1	3,8	3,6	3,4

Деформационная способность уплотненных грунтов при динамических нагрузках оценивается с помощью коэффициентов относительного

сжатия, значение которых предлагается определять по (табл. 6). По коэффициенту  $\delta_p$  можно определить  $S_{доп}$  для активной зоны.

Таблица 6

## Значение коэффициентов относительного сжатия

Степень влажности $S_r$	$\delta_p$ , кгс/м <sup>3</sup> при $\rho_d$ кН/м <sup>3</sup>							
	17,5		17,0		16,5		16,0	
	Нагрузка, МПа							
	0,15	0,2	0,15	0,2	0,15	0,2	0,15	0,2
0,65	0,11	0,15	0,2	0,3	0,35	0,5	0,6	0,8
0,85	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0

Предлагаемые значения  $R$ ,  $E_0$ ,  $C_z$  и  $\delta_p$  рекомендуется использовать для предварительных расчетов оснований и фундаментов сооружений I и II классов, а также окончательных расчетов для сооружений III и IV классов. Использование предлагаемых рекомендаций позволяет более рационально проектировать фундаменты, повышать технико-экономическую эффективность, способствовать снижению материалоемкости.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абелев Ю.М., Абелев М.Ю. Основы проектирования и строительства на просадочных макропористых грунтах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Госстройиздат, 1968. 203 с.

2. Гильман Я.Д. Некоторые особенности уплотнения лессовых грунтов трамбовками повышенного веса. Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве / «Материалы VIII Всесоюзного совещания» // Киев, «Будівельник», 1974. С 62 – 65.

3. Джитенов А.К., Куликов Г.В. Искусственные основания и устойчивость инженерных сооружений на Прикопетдагской равнине. Изд. ТГУ, Ашхабад, 1977. 142 с.

4. Инструкция по определению несущей способности подушек из различного материала

на объектах строительства в Тур. ССР. Ашхабад: Госстрой ТССР, 1979. С 20.

5. Калачук Т.Г., Юрьев А.Г., Карякин В.Ф., Меркулов С.И. Повышение несущей способности опорных конструкций дисперсных грунтах // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 11. С. 73-75.

6. Крутов В.И. Уплотнение просадочных грунтов. М.: Стройиздат, 1974. 207 с.

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

8. Куликов Г.В. Совершенствование методов строительства на лессовых просадочных грунтах в Тур. ССР. Туркменское РП НТО «СИ». Ашхабад, 1984. 48 с.

9. Куликов Г. В. Расчет и проектирование фундаментов сооружений на лессовых грунтах в ТССР. Ашхабад: Изд. Минвуза ТССР, 1984. 120 с.

10. ГОСТ 22733-2002. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. 22 с.

11. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. М.: Росстандарт, 2011. 40 с.

12. СП 45.13330.2012. Земляные сооружения, основания и фундаменты. М.: Росстандарт, 2012. 73 с.