

По этой причине более практичны и экономичны прямоугольные трамбовки с двумя каретками, расположенными на смежных боковых гранях трамбовки (рис.3, а; а.с. СССР №1807168). Это позволяет путем разовой замены кареток в направляющей штанге базовой машины производить вытрамбовывание крестообразных котлованов, вначале вдоль одной оси, затем вдоль другой.

Трамбовка, изображенная на рис. 3, б, выполнена с возможностью вращения относительно каретки (посредством болтового соединения) и представлена также в виде усеченной прямоугольной пирамиды. Это позволяет путем поворота трамбовки относительно каретки на 90° вытрамбовывать крестообразные котлованы, которые не могут быть образованы обычными трамбовками.

Трамбовка, показанная на рис. 3, в (патент РФ №2012717), содержит взаиморазворачивающиеся верхнюю и нижнюю плиты, соединенные между собой болтовым соединением с возможностью вращения. Это позволяет образовывать котлованы, а затем и фундаменты звездообразные или сложной формы, обладающие теми же достоинствами, что и крестообразные.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кречин А.С., Чернюк В.П., Шведовский П.В. и др. Ресурсосберегающие фундаменты на сельских стройках. – Кишинёв: Картя Молдовеняескэ, 1990.- 248 с.
2. Чернюк В.П., Пчёллин В.Н., Сташевская Н.А. Технология строительства в особых условиях. Курс лекций. – Брест, 2005.-131 с.

УДК 624.155.001

**ЧЕРНЮК М.В.**

*Научные руководители: Чернюк В.П., доцент, к.т.н., Сташевская Н.А., доцент, к.т.н., Хуснутдинова В.Я., доцент, к. ф.-м. н*

#### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ ТРАМБОВОК ДЛЯ УСТРОЙСТВА ФУНДАМЕНТОВ В ВЫТРАМБОВАННЫХ КОТЛОВАНАХ

Для эффективного использования фундаментов в вытрамбованных котлованах при возведении зданий и сооружений необходимо решить три технологические задачи:

1. Определить оптимальную величину наклона граней трамбовки при устройстве фундаментов в вытрамбованных котлованах.
2. Определить требуемое число ударов трамбовки для вытрамбовки котлованов.
3. Определить требуемую грузоподъёмность механизмов для извлечения трамбовок из грунта.

Решение этих технологических задач представляем ниже:

#### **1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ НАКЛОНА ГРАНЕЙ ТРАМБОВКИ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ФУНДАМЕНТОВ В ВЫТРАМБОВАННЫХ КОТЛОВАНАХ**

Одной из задач в области вытрамбовывания котлованов является установление оптимальной величины наклона граней трамбовки при устройстве фундаментов в вытрамбованных котлованах (ФВК).

При определении рациональной формы и оптимальной величины наклона граней трамбовки следует исходить из того, что устойчивость грунта при вытрамбовывании котлованов существенно повышается с увеличением угла наклона граней к вертикали стенок котлована и приближении его формы в плане к окружности. Кроме того, в этом случае устойчивость грунта повышается также вследствие того, что при большем наклоне граней трамбовки достигается больший эффект уплотнения как по размерам уплотненной зоны, так и по плотности грунта в ней. Однако при чрезмерном увеличении на-

клона граней трамбовки несущая способность фундамента хотя и возрастает, более интенсивно увеличивается объем котлована, а, следовательно, расход бетона. Получается, что чрезмерное увеличение наклона граней трамбовки малоэффективно. С другой стороны, при уменьшении наклона граней трамбовки возникает опасность обрушения стенок котлована при извлечении трамбовки из грунта.

Для определения оптимального угла наклона граней трамбовки решим первую задачу. При этом, для упрощения ее постановки и последующего решения, во-первых, в пределах глубины вытрамбовки котлована примем однородный однослойный грунт, что вполне допустимо, т.к. глубина вытрамбовки невелика и редко превышает 2,5...3,0 м. Во-вторых, с точки зрения максимальной эффективности уплотняемости грунта вокруг котлована примем саму трамбовку в виде усеченного конуса, ориентированного вниз меньшим основанием, что позволяет, с небольшой долей погрешности, перейти на эффективные шести-, восьми-, двенадцати и др. многогранные трамбовки (рис. 1).

Исходя из этих предпосылок, установим рациональную величину наклона граней трамбовки, при которой грунт стенок котлована не будет обрушаться или разрушаться. Для этого необходимо выполнение двух условий:

1. Вертикальная составляющая отпора грунта  $F_0$  должна быть не меньше силы трения грунта с трамбовкой  $F_{тр}$ , т.е.  $F_0 \cdot \sin 2\alpha \geq f \cdot F_0 \cdot \cos 2\alpha$ , где  $f$  – коэффициент трения грунта о трамбовку, дол. ед. Решая приведенное неравенство относительно  $\alpha$  имеем:

$$\alpha \geq \frac{1}{2} \operatorname{arctg} f. \quad (1)$$

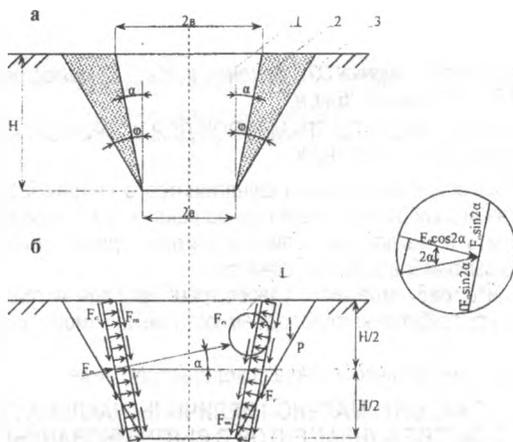


Рис. 1. Схемы для определения угла наклона граней трамбовки при вытрамбовывании котлованов (а) и раскладки сил по граням трамбовки (б):

1 – трамбовка; 2 – призма обрушения; 3 – грунт

2. Вертикальная составляющая силы  $F_c$  не должна превышать силу тяжести грунта  $P$ , заключенного в объем призмы обрушения

$$F_c \cdot \cos \alpha \leq P, \quad (2)$$

где  $F_c = \pi \cdot H \cdot (a + H \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot \tau_c$  – сила сцепления грунта с трамбовкой, кН;

$P$  – сила тяжести грунта призмы обрушения, кН;

$\tau_c$  – расчетное сцепление грунта с боковой поверхностью трамбовки, кПа;

$\alpha$  – угол наклона граней трамбовки к основанию, град;  
 $v$  – радиус верхнего основания, м;  
 $a$  – радиус нижнего сечения трамбовки, м;  
 $F_0$  – сила отпора грунта на трамбовку, кН;  
 $F_{тр}$  – сила трения грунта с трамбовкой, кН;

Сила тяжести призмы обрушения  $P$  может быть определена по формуле немецкого инженера Бреннеке [1], предложившего её ещё в конце позапрошлого столетия. В его расчётах сопротивления выдёргиванию приравнялось весу усечённого конуса  $P$

$$P = \rho \cdot V \cdot g = \frac{1}{3} \pi \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot [(a^2 + a \cdot (a+H \cdot \operatorname{tg} \varphi) + (a+H \cdot \operatorname{tg} \varphi)^2)], \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность грунта, т/м<sup>3</sup>;  
 $V$  – объём призмы обрушения, м<sup>3</sup>;  
 $g$  – ускорение свободного падения, равно 9,81 м/с<sup>2</sup>.  
 $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта, град.

Считая, что  $\alpha \ll H$ , а  $\cos \alpha \approx 1$ , после упрощения выражения (2) будем иметь:

$$\alpha \leq \operatorname{arctg} \frac{\rho \cdot g \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi}{3 \cdot \tau} \quad (4)$$

Расчеты, выполненные по формулам (1) и (3), показывают, что для реальных трамбовок угол наклона граней  $\alpha$  должен составлять 5...15°, тогда как в известных трамбовках, применяющихся в практике фундаментостроения России, Украины, Беларуси, Молдовы, он колеблется от 6° до 15°. Это позволяет производить расчеты углов наклона граней трамбовок применительно к различным грунтовым условиям.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА УДАРОВ ТРАМБОВКИ ДЛЯ ВЫТРАМБОВКИ КОЛОВАНОВ

Для определения числа ударов трамбовки и энергоемкости вытрамбовки котлованов необходимо аналитическим путем решить вторую задачу. Условия задачи: грунт в пределах вытрамбовки однослойный однородный; трамбовка выполнена в виде ориентированной вниз меньшим основанием прямоугольной пирамиды. Расчётная схема представлена на рис. 1.

На промежуточном этапе вытрамбовывания котлована трамбовка с размерами верхнего сечения  $a$  и  $v$  погружена в грунт на глубину  $h$ , а полная высота трамбовки составляет  $H$ . Вначале установим энергоемкость вытрамбовывания котлована одной гранью, например  $ABB_1A_1$ , а затем всеми гранями.

На боковой поверхности грани  $AA_1B_1B$  выделим элементарный участок на расстоянии  $x$  от начала отсчета координат шириной  $dx$  и длиной  $z = v \cdot \frac{h-x}{H}$ .

Со стороны грунта на элементарный участок при вытрамбовывании действует предельное сопротивление грунта  $R$ , которое возникает в результате его разрушения гранью  $ABB_1A_1$  трамбовки и которое можно разложить на вертикальную  $R^B = R \sin \alpha$  и горизонтальную  $R^r = R \cos \alpha$  составляющие. Таким образом, со стороны грунта на элементарный участок действует вертикальная  $dP^B$  и горизонтальная  $dP^r$  элементарные силы, которые соответственно равны

$$dP^B = R^B z dx = R \cdot \sin \alpha \cdot v \cdot \frac{h-x}{H} dx; \quad (5, a)$$

$$dP^r = R^r z dx = R \cdot \cos \alpha \cdot v \cdot \frac{h-x}{H} dx. \quad (5, б)$$

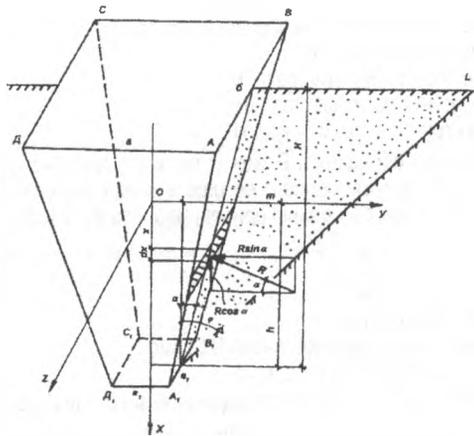


Рис. 2. Расчетная схема для определения энергоемкости вытрамбовывания котлована

Полные горизонтальные и вертикальные составляющие сопротивления грунта разрушению на погруженную в грунт грань  $ABB_1A_1$  определяются:

$$P^h = \int_0^h R \cdot \sin \alpha \cdot b \cdot \frac{h-x}{H} dx = \frac{R \cdot \sin \alpha \cdot b \cdot h^2}{2 \cdot H}; \quad (6, a)$$

$$P^v = \int_0^h R \cdot \cos \alpha \cdot b \cdot \frac{h-x}{H} dx = \frac{R \cdot \cos \alpha \cdot b \cdot h^2}{2 \cdot H} \quad (6, б)$$

На преодоление вертикального  $P^v$  и горизонтального  $P^h$  сопротивлений грунта разрушению и уплотнению в стенки скважины требуются дополнительные затраты энергии, которые при полном заглублении трамбовки в грунт составляют

$$\mathfrak{E}^v = \int_0^H P^v dh = \int_0^H \frac{R \cdot \sin \alpha \cdot b \cdot h^2}{2 \cdot H} dh; \quad (7, a)$$

$$\mathfrak{E}^h = \int_0^L P^h dm = \int_0^L \frac{R \cdot \cos \alpha \cdot b \cdot h^2}{2 \cdot H} dm. \quad (7, б)$$

Учитывая, что  $m = htg \varphi$ , где  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта, после преобразования получим

$$\mathfrak{E}^v = \frac{R \cdot \sin \alpha \cdot b \cdot H^2}{6}; \quad (8, a)$$

$$\mathfrak{E}^h = \frac{R \cdot \cos \alpha \cdot b \cdot H^2 \cdot tg \varphi}{6} \quad (8, б)$$

Общие затраты энергии на вытрамбовывание скважины с четырьмя гранями трамбовки будут равны

$$\mathfrak{E} = \frac{R}{3} \cdot H^2 \cdot (b \cdot \sin \alpha + a \cdot \sin \beta + b \cdot \cos \alpha \cdot tg \varphi + a \cdot \cos \beta \cdot tg \varphi) + R \cdot H \cdot a_1 \cdot b_1 \quad (9)$$

- где  $a, b$  – размеры верхнего основания трамбовки, м;  
 $a_1, b_1$  – размеры нижнего основания трамбовки, м;  
 $\alpha$  и  $\beta$  – соответственно углы наклона граней трамбовки к основаниям, град;  
 $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта, град;  
 $H$  – высота трамбовки, м;  
 $R$  – предельное сопротивление грунта разрушению, кПа.

Вычислив по формуле (9) общие затраты энергии  $\mathfrak{E}$  и зная энергию одного удара трамбовки  $A=Ql$ , можно определить требуемое количество ударов трамбовки для образования вытрамбованной скважины в грунте под фундаментом

$$n = \frac{\mathcal{E}}{Q \cdot l}, \quad (10)$$

где  $Q$  – сила тяжести трамбовки, кН;

$l$  – высота падения трамбовки, м.

Например, при  $H=2$  м,  $\alpha=\beta=10^\circ$ , массе трамбовки  $Q=5$  т (50 кН), падающей с высоты  $l=5$  м в суглинистые грунты с  $\varphi=30^\circ$ ,  $R=2000$  кПа, энергетические затраты на вытрамбовывание одной скважины по формуле (9) составляют  $\mathcal{E}=3250$  кДж, а количество ударов по формуле (10) –  $n=13$ , что подтверждается ранее сказанным и опытом других авторов.

Проведенные экспериментальные исследования по вытрамбовыванию котлованов в суглинистых грунтах с аналогичными условиями и параметрами трамбовок показали, что для образования скважин требуется 12...15 сбрасываний, что достаточно близко совпадает с расчетным количеством ударов.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ГРУЗОПОДЪЁМНОСТИ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТРАМБОВОК ИЗ КОТЛОВАНОВ

Для решения этой задачи воспользуемся расчётной схемой, показанной на рис. 3.

Усилие, необходимое для извлечения трамбовки из скважины в конце вытрамбовки, должно превышать собственный вес трамбовки и сопротивление сдвигу по боковой её поверхности. При этом необходимо учитывать, что горизонтальная составляющая сопротивления сдвига способствует выталкиванию трамбовки из котлована (аналогично морозному пучению грунта) вертикальная же – препятствует за счёт сцепления трамбовки с грунтом (аналогично анкеру), т.е.

$$N = Q + 2 \cdot \frac{b \cdot H}{2} \cdot \frac{\tau}{\sin \alpha} \cdot \cos \alpha + 2 \cdot \frac{a \cdot H}{2} \cdot \frac{\tau}{\sin \beta} \cdot \tau \cdot \cos \beta - 2 \cdot \frac{b \cdot H}{2} \cdot \frac{\tau}{\sin \alpha} \cdot f \cdot \sin \alpha - 2 \cdot \frac{a \cdot H}{2} \cdot \frac{\tau}{\sin \beta} \cdot f \cdot \cos \beta = Q + H \cdot \tau \cdot [b \cdot (\operatorname{ctg} \alpha - f) + a \cdot (\operatorname{ctg} \beta - 1)], \quad (11)$$

где  $Q$  – вес трамбовки, кН;

$H$  – высота трамбовки, м;

$a, b$  – размеры верхнего сечения трамбовки, м;

$\alpha, \beta$  – углы наклона граней трамбовки к вертикали, град;

$f$  – коэффициент трения материала по грунту, дол.ед.

Например, при следующих исходных данных:

$Q=5$  т. (50 кН);  $H=2$  м;  $a^*b=1.25$  м;  $a^*b_1=0.6^*0.6$  м;  $\alpha = \beta = 14^\circ$ ; высоте падения трамбовки  $l=5$  м; грунт - суглинок с  $\varphi=30^\circ$ ;  $R=2000$  кПа (200 т/м<sup>2</sup>);  $\tau=8$  кПа (0.8 т/м<sup>2</sup>),  $f=0.5$  будем иметь  $N=5+2 \cdot 0.8 \cdot [1.25 \cdot (4.0-0.5)+1.25 (4.0-0.5)]=19$  т.

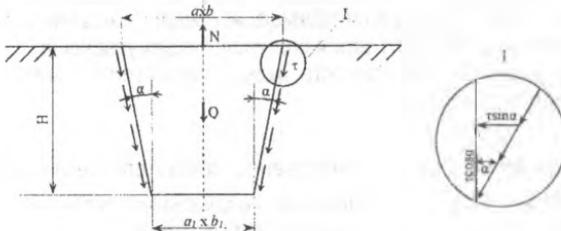


Рис. 3. Расчётная схема для определения требуемого усилия извлечения трамбовки из грунта со схемой раскладки сил.

Это означает, что на извлечение трамбовки из грунта требуется почти четырёхкратное ( $19/5 \approx 4$ ) усилие, чем на её поднятие. Таким образом, для вытрамбовки фундаментов под ФВК требуется трамбовка весом 5т и кран грузоподъёмностью 20т. На самом деле нормативные документы требуют увеличение грузоподъёмности в 2.5...3.5 раза, что достаточно близко совпадает с представленными расчётными данными.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Чернюк В.П., Пчёлин В.Н., Сташевская Н.А. Технология строительства в особых условиях. Курс лекций. – Брест, 2005.-131 с.
2. Чернюк М.В., Сташевская Н.А. Устройство для изготовления винтонабивных свай.//Сборник конкурсных работ молодых учёных, аспирантов и студентов.- Брест, 2004.-С.106-108.
3. Чернюк М.В., Чернюк В.П. Конструкция забивной сваи повышенной несущей способности с уширенным основанием.//Сборник конкурсных работ молодых учёных, аспирантов и студентов.- Брест,2004.-С.108-110.
4. Чернюк В.П., Пойта П.С. Расчёт, проектирование и устройство свайных фундаментов.- Брест, облитпография, 1998.-С.216.

УДК 624.131.15(155:138)

МЕКШ Е.Э.

*Научные руководители: Шведовский П.В., профессор, к.т.н., Курись Н.Г.*

#### АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ОДНОРОДНОСТИ СВОЙСТВ ГРУНТОВ В ПРЕДЕЛАХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАЙОНОВ, ОБЛАСТЕЙ И РЕГИОНОВ

По принципу аналогии систематизацию, обобщение, анализ и оценку на этих уровнях можно проводить так же, как и на уровне инженерно-геологического участка [6]. Однако в связи с большим объемом фактического материала здесь оказывается возможным представлять результаты обработки в виде таблиц расчетных показателей. При этом целесообразно в таблицах показывать характеристики состава и физических свойств для отдельных участков. Что же касается показателей механических свойств, то они даются в таблице расчетных характеристик применительно к разным генетическим и литологическим типам грунтов [1, 3].

Для составления региональных таблиц нормативных и расчетных показателей свойств грунтов можно применить методику, в основу которой положено выявление соотношений между обобщенными для отдельных инженерно-геологических элементов показателями свойств грунтов [2, 4, 5]. Большая часть таких элементов составляет «обучающую» выборку, по которой строится таблица, меньшая – «экзаменационную», по которой проверяется правильность построения прогнозирующих уравнений.

Уравнение, аппроксимирующее зависимость между показателями механических и физических свойств, ищется в виде

$$\bar{Y}_j = a_0 + a_1 \bar{X}_1 + \dots + a_p \bar{X}_p + \sigma_j \quad (j = 1, 2, \dots, k), \quad (1)$$

где  $\bar{Y}_j, \bar{X}_1, \dots, \bar{X}_p$  - средние значения, соответственно, показателя механического свойства и физических свойств, полученные по всем индивидуальным значениям в пределах  $j$ -го инженерно-геологического элемента;  $k$  – число таких элементов.

Оптимальный набор коэффициентов в уравнении (1) целесообразно находить методом включения, который состоит в последовательном введении переменных в это уравнение. Первым выбирается фактор-аргумент, который имеет максимальный коэффициент парной корреляции с фактором-функцией. Порядок включения оставшихся перемен-