

In article the features of numeric verification of structural mechanics tasks are discussed based on symbolic-analytic approach presented in papers [1], [3]. There are results are used as a standard solution generated on industry CAE system Autodesk Robot Structural Analysis for an arbitrary test construction. The comparison is provided for the fixing reactions, internal force factors as well as node point's deflections.

УДК 624.155.001

Чернюк В.П., Семенюк С.М., Шведовский П.В.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЁТУ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТРАМБОВОК ПРИ УСТРОЙСТВЕ ФУНДАМЕНТОВ В ВЫТРАМБОВАННЫХ КОТЛОВАНАХ

Введение. Для эффективного использования фундаментов в вытрамбованных котлованах (ФВК) 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.

Определение оптимальной величины наклона граней трамбовки при устройстве фундаментов в вытрамбованных котлованах. 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 наклона 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 примем, что в пределах глубины вытрамбовки котлована грунт однородный однослойный, т.к. глубина вытрамбовки редко превышает 2,5...3,0 м.

С целью максимальной эффективности уплотняемости грунта вокруг котлована примем трамбовку в виде усеченного конуса, ориентированного вниз меньшим основанием, что позволяет, с минимальной долей погрешности, перейти на эффективные многогранные шести-, восьми-, двенадцати и др. 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_{mp} , т.е.

$F_0 \cdot \sin 2 \cdot \alpha \geq f \cdot F_0 \cdot \cos 2 \cdot \alpha$, где α – угол наклона граней трамбовки к основанию, град; f – коэффициент трения грунта о трамбовку, дол. ед. Решая приведенное неравенство относительно α , имеем:

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

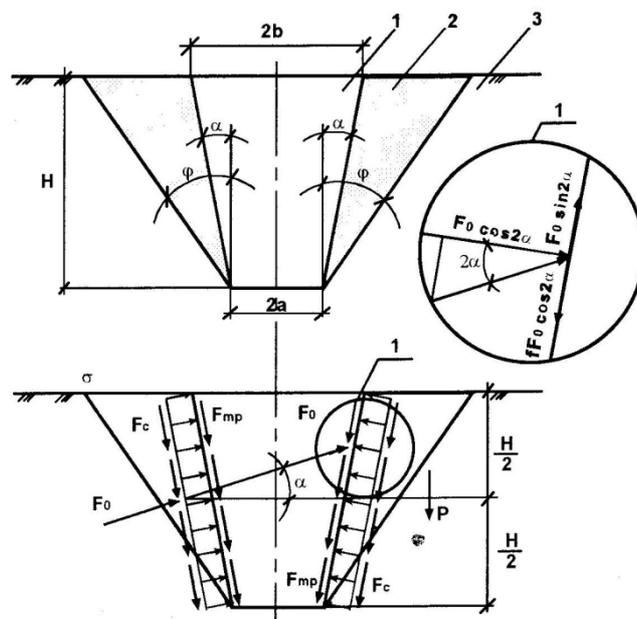


Рис. 1. Схемы для определения угла наклона граней трамбовки при вытрамбовывании котлованов (а) и действия сил по граням трамбовки (б): 1 – трамбовка; 2 – призма обрушения; 3 – грунт

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 $F_C = \pi \cdot H \cdot (a+H \cdot \tg \alpha) \cdot \tau_C$ – сила сцепления грунта с трамбовкой, кН;

P – сила тяжести грунта призмы обрушения, кН;

τ_C – расчетное сцепление грунта с боковой поверхностью трамбовки, кПа;

α – угол наклона граней трамбовки к основанию, град;

ν – радиус верхнего основания, м;

a – радиус нижнего сечения трамбовки, м;

F_0 – сила отпора грунта на трамбовку, кН;

F_{mp} – сила трения грунта с трамбовкой, кН.

Сила тяжести призмы обрушения P может быть определена по формуле Бреннеке с учётом условия, что сопротивление выдёргиванию равно весу усечённого конуса P .

Чернюк Владимир Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства Брестского государственного технического университета.

Семенюк Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

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

где ρ – плотность грунта, т/м³;
 V – объём призмы обрушения, м³;
 g – ускорение свободного падения;
 φ – угол внутреннего трения грунта, град.

Считая, что $\alpha \ll H$, после упрощения выражения (2) с подстановкой в него P из выражения (3) будем иметь:

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

Например, при следующих исходных данных ($H=3\text{м}$; $g=1\text{м/с}^2$; $q=9,81\text{ м/с}^2$; $\varphi=27^\circ$; $\operatorname{tg} \varphi=0,51$; $\tau_c=20\text{кПа}$; $f=0,21$) угол наклона граней трамбовки α из выражения (1) должен быть

$$\alpha_1 \geq \frac{1}{2} \operatorname{arctg} f = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} 0,21 = 6^\circ,$$

а из выражения (4):

$$\alpha_2 \leq \arcsin \frac{H \cdot q \cdot g \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi}{3 \cdot \tau_c} = \arcsin \frac{3 \cdot 1,6 \cdot 9,81 \cdot 0,51^2}{3 \cdot 20} = \arcsin 0,2 = 12^\circ,$$

т.е. находиться в пределах от 6° до 12° .

Расчёты, выполненные по формуле (1) и (4), показывают, что для реальных трамбовок угол наклона α должен составлять $5 \dots 15^\circ$, тогда как в известных трамбовках, применяющихся в практике фундаментостроения Беларуси и стран СНГ, он колеблется от 6° до 22° [1, 3].

Определение числа ударов трамбовки и энергоёмкости вытрамбовки колованов. Расчетная схема представлена на рис. 2.

На промежуточном этапе вытрамбовывания котлована трамбовка с размерами верхнего сечения a и b погружена в грунт на глубину h , а полная высота трамбовки составляет H . Вначале установим энергоёмкость 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 $z = b \cdot \frac{h-x}{H}$.

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 $R^B = R \cdot \sin \alpha$ и горизонтальную $R^Г = R \cdot \cos \alpha$ составляющие. Таким образом, со стороны грунта на элементарный участок действует вертикальная dP^B и горизонтальная $dP^Г$ элементарные силы, которые соответственно равны

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

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

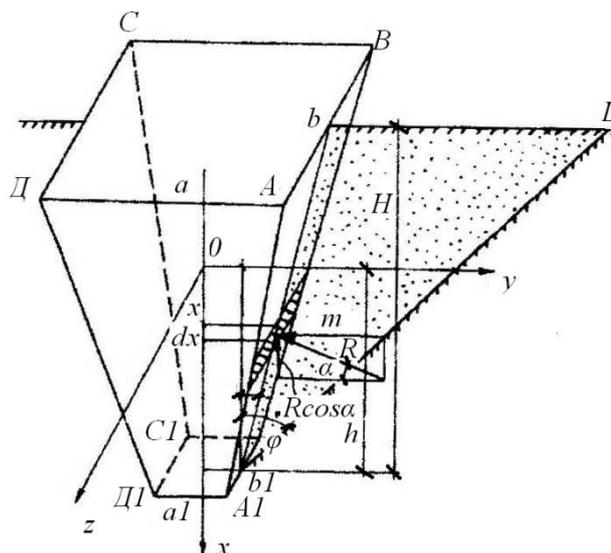


Рис. 2. Расчетная схема для определения энергоёмкости вытрамбовывания котлована

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

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

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

На преодоление вертикального P^B и горизонтального $P^Г$ сопротивлений грунта разрушению и уплотнению в стенки котлована требуются дополнительные затраты энергии, которые при полном заглублении трамбовки в грунт составляют:

$$\mathcal{E}^B = \int_0^H R^B \cdot dh = \int_0^H \frac{R \cdot \sin \alpha \cdot b \cdot h^2}{2 \cdot H} \cdot dh; \quad (7,а)$$

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

Учитывая, что $m = h \operatorname{tg} \varphi$, где φ – угол внутреннего трения грунта, после соответствующих преобразований получаем:

$$\mathcal{E}^B = \frac{R \cdot \sin \alpha \cdot b \cdot h^2}{6}; \quad (8,а)$$

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

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

$$\mathcal{E} = \frac{R}{3} \cdot H^2 \cdot (b \cdot \sin \alpha + a \cdot \sin \beta + b \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + a \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi) + R \cdot H \cdot a_1 \cdot \epsilon_1, \quad (9)$$

где a, b – размеры верхнего основания трамбовки, м;
 a_1, ϵ_1 – размеры нижнего основания трамбовки, м;
 α и β – соответственно углы наклона граней трамбовки к основаниям, град;
 H – высота трамбовки, м;
 R – предельное сопротивление грунта разрушению, кПа.

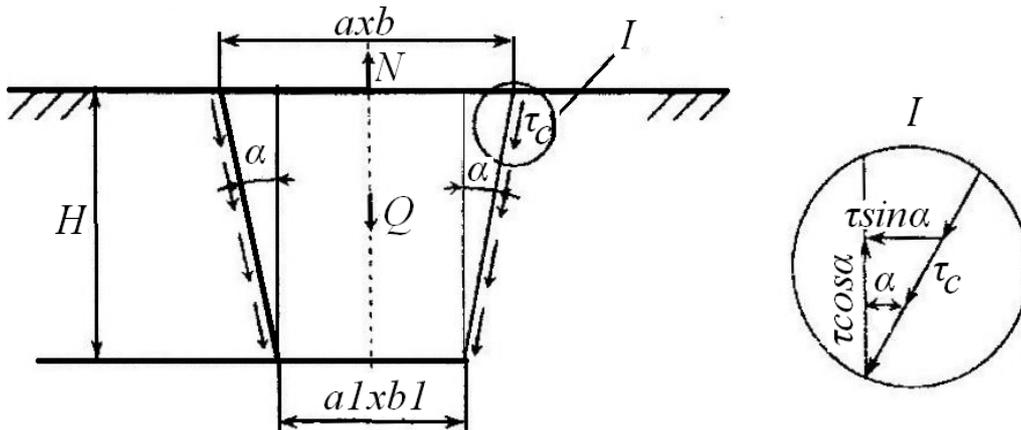


Рис. 3. Расчётная схема для определения требуемого усилия извлечения трамбовки из грунта (а) со схемой раскладки сил (б)

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

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

где Q – сила тяжести трамбовки, кН;

l – высота падения трамбовки, м.

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

Определение требуемой грузоподъемности механизмов для извлечения трамбовок из котлованов. Расчётная схема извлечения трамбовки из грунта котлована представлена 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 лучению грунта), вертикальная же – препятствует за счёт сцепления трамбовки с грунтом (аналогично анкеру), т.е.

$$\begin{aligned} N &= Q + 2 \cdot \frac{b \cdot H}{2} \cdot \frac{\tau_c}{\sin \alpha} \cdot \cos \alpha + \\ &+ 2 \cdot \frac{a \cdot H}{2} \cdot \frac{\tau_c}{\sin \beta} \cdot \tau_c \cdot \cos \beta - 2 \cdot \frac{b \cdot H}{2} \cdot \frac{\tau_c}{\sin \alpha} \cdot f \cdot \sin \alpha - \\ &- 2 \cdot \frac{a \cdot H}{2} \cdot \frac{\tau_c}{\sin \beta} \cdot f \cdot \cos \beta = \\ &= Q + H \cdot \tau_c \cdot [b \cdot (\text{ctg} \alpha - f) + a \cdot (\text{ctg} \beta - f)], \end{aligned} \quad (11)$$

где Q – вес трамбовки, кН;

H – высота трамбовки, м;

τ_c – сила сцепления грунта с трамбовкой, кПа;

a, b – размеры верхнего сечения трамбовки, м;

α и β – углы наклона граней трамбовки к вертикали, град;

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

Определим усилие извлечения трамбовки из котлована при следующих данных:

$Q=50\text{ кН}$; $H=2\text{ м}$; $a \times b=1,25\text{ м}$; $a_1 \times b_1=0,6 \times 0,6\text{ м}$; $\alpha = \beta = 14^\circ$; грунт – суглинок с $\varphi = 30^\circ$; $\tau_c = 8\text{ кПа}$; $f=0,5$ будем иметь

$$\begin{aligned} N &= 50 + 2 \cdot 8 \cdot [1,25 \cdot (4,0 - 0,5) + \\ &+ 1,25 \cdot (4,0 - 0,5)] = 190\text{ кН}. \end{aligned}$$

Это означает, что на извлечение трамбовки из грунта требуется более чем трёхкратное ($19/5 \approx 3,8$) усилие, чем на её поднятие. Таким образом, для вытрамбовки котлованов под ФВК трамбовкой весом 5т требуется кран грузоподъемностью 20т. На самом деле нормативные документы требуют увеличения грузоподъемности механизмов более чем в 2,5 раза по сравнению с весом трамбовки, что достаточно близко совпадает с представленными расчетными данными.

Заключение. Представленные рекомендации по расчёту и проектированию трамбовок при устройстве ФВК в некоторой степени дают возможность определять оптимальную величину наклона граней трамбовки, устанавливать необходимое число её ударов при устройстве котлованов и требуемую грузоподъемность механизмов для извлечения трамбовок из котлованов, что позволяет повысить эффективность устройства ФВК.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чернюк, В.П. Расчет, проектирование и устройство свайных фундаментов / В.П. Чернюк, П.С. Пойта – Брест: Облтипография, 1998. – 215 с.
2. Чернюк, В.П. Технология строительства в особых условиях: курс лекций / В.П. Чернюк [и др.] – Брест, 2005. – 131 с.
3. Кречин, А.С. Ресурсосберегающие фундаменты на сельских стройках / А.С. Кречин, В.П. Чернюк, П.В. Шведовский, А.Т. Мальцев, Н.А. Мальцева – Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1990 – 248 с.

Материал поступил в редакцию 20.11.10

CHERNIUK V.P., SIEMIENIUK S.M., SHVIADOUSKI P.V. Recommendations for calculation and making projects of ramming in constructed foundations in rammed excavations

Technological determinations of problems of defining of an optimum size of a slope of verge of ramming in arrangement of foundations in ramming foundation pits defining the demanding number of blows for their ramming to the defining of hosting capacity of mechanisms to extracte of ramming are presented in this article.