

УДК 624.15 + 624.131:561.5

**ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ  
ТЯЖЕЛЫМИ ТРАМБОВКАМИ**

**Клебанюк Д.Н., Пойта П.С., Шведовский П.В.**  
Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь

В статье приведены результаты исследований по оптимизации размеров и форм подошвы трамбовок, а соответственно массы, высоты сбрасывания, расстояния между точками уплотнения, технология и организация производства работ с учетом как инженерно – геологических условий, так и конструктивно – технологических параметров и факторов.

Results of researches on optimization of the sizes and forms of a sole of tampers, and respectively a weight, heights of a sbrasyvaniye, distancies between consolidation points are given in article, technology and the works organization taking into account both inzhenerno – geological conditions, and is constructive – technological parameters and factors.

Анализ исследований [1, 2, 3] показал, что с увеличением модуля деформации грунтов  $E_0$  в естественном состоянии требуется уменьшение диаметра трамбовки  $d_{тр}$  и при прочих постоянных условиях (естественная и требуемая плотности сухого грунта

$\rho_d^{ecm}$  и  $\rho_d^{mp}$ , мощность уплотняемой толщи  $h_{yn}$ , энергия удара  $M_j$  описывается следующими зависимостями:

$$d_{mp}^1 = 41.68 \cdot \lg(E_0 - 1.37) + 0.79, \quad (1)$$

и

$$d_{mp}^2 = 14.07 \cdot E_0^{-1.19} - 2.56, \quad (2)$$

с индексами корреляции –  $R_1 = R_2 = 0.998$  и суммой квадратов отклонений –  $S_1 = 0.498$ ,  $S_2 = 0.556$ .

При этом уменьшение  $d_{mp}$  возможно до определенных пределов, так как при  $d_{mp} < 1.0$  м происходит разуплотнение грунта с образованием зон выпора за пределами пяты трамбования.

Выявлено также, что чем больше мощность уплотняемого слоя  $H_{yn}$ , тем  $d_{mp}$  (при прочих постоянных условиях) должен быть меньше и зависимости между ними имеют следующий вид:

$$d_{mp}^1 = -3.05 \cdot \lg(H_{yn} - 0.36) + 7.94, \quad (3)$$

$$d_{mp}^2 = 10.01 \cdot H_{yn}^{-0.54} - 0.6, \quad (4)$$

с индексами корреляции –  $R_1 = 0.994$ ;  $R_2 = 1.0$  и суммой квадратов отклонений –  $S_1 = 0.321$ ,  $S_2 = 0.244$ .

А это определяет необходимость при уплотнении грунтовых толщ большой мощности одновременно с увеличением  $d_{mp}$  увеличивать массу трамбовки  $M$  и высоту сброса  $H$ .

При этом, чем больше требуемая плотность сухого грунта  $\rho_d^{mp}$ , тем  $d_{mp}$  (при прочих постоянных условиях) должен быть меньше и зависимости между ними имеют следующий вид:

$$d_{mp}^1 = -0.13 \cdot \lg(\rho_d^{mp} - 0.77) + 1.8, \quad (5)$$

$$d_{mp}^2 = 0.49 \cdot (\rho_d^{mp})^{-0.92} + 1.51, \quad (6)$$

с индексами корреляции –  $R_1 = 1.0$ ,  $R_2 = 0.999$  и суммой квадратов отклонений –  $S_1 = 0.0017$ ,  $S_2 = 0.0009$ .

Следует отметить, что наибольшая эффективность уплотнения грунтовых оснований достигается при оптимальной влажности грунтов  $w_{opt}$ . При влажности ниже  $w_{opt}$  требуется большая энергия на разрушение существующей и формирование новой структуры, что и обуславливает уменьшение глубины  $H_{уп}$  при некотором повышении степени уплотнения. Так, например, для глинистых грунтов снижение влажности ниже оптимальной на 4 – 5% приводит к уменьшению глубины уплотнения  $H_{уп}$  до 15 – 20%.

На рис. 1 дан график зависимости  $\rho_d = f(w)$ , который показывает, что максимальное значение плотности сухого грунта  $\rho_d^{max}$  достигается при  $w_{opt}$ , причем с увеличением содержания глинистых частиц значение  $\rho_d^{max}$  возрастает.

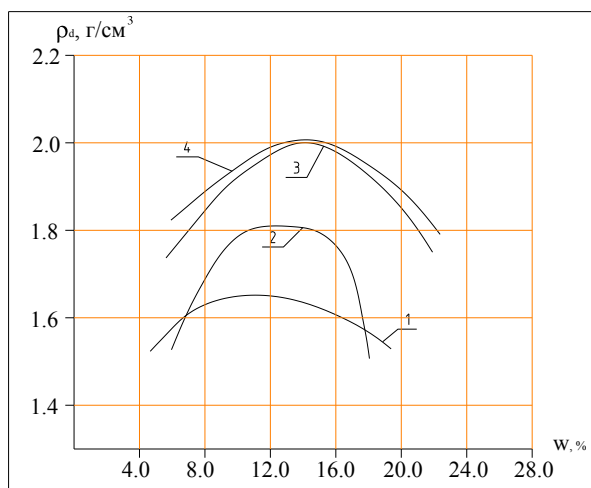


Рис. 1. График зависимости плотности сухого грунта ( $\rho_d$ ) от влажности ( $w$ ):  
 1 – песок пылеватый; 2 – супесь пылеватая; 3 – супесь моренная (пластичная);  
 4 – суглинок моренный

Отсюда следует, чем однороднее грунт, тем его плотность будет выше при одних и тех же энергозатратах на уплотнение.

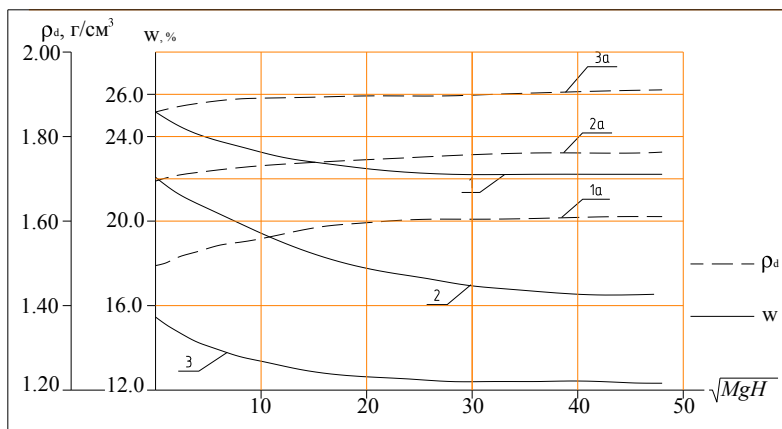


Рис. 2. Графики зависимости изменения влажности грунтов  $W$  и плотности сухого грунта  $\rho_d$  от энергии удара  $\sqrt{MgH}$ :

1 – пески пылеватые; 2 – супеси пылеватые; 3 – супеси пластичные;

Исследования по изменению влажности ( $w$ ) и плотности сухого грунта ( $\rho_d$ ) при уплотнении тяжелыми трамбовками [2, 3] (рис. 2) показал, что чем больше энергия удара ( $\sqrt{MgH}$ ), тем  $w$  меньше. При этом практически для всех видов и состояний грунтов наибольшее снижение  $w$  характерно на первоначальном этапе уплотнения и даже при малой энергии удара. Увеличение энергии удара обуславливает уменьшение  $w$ , но оно очень незначительное. Что касается изменений  $\rho_d$ , то оно имеет обратную тенденцию, т. е. при увеличении энергии удара  $\rho_d$  увеличивается и, особенно, на начальном этапе уплотнения.

Расчетные зависимости для связей этих величин, т.е.  $w = f(\sqrt{MgH})$  и  $\rho_d = f(\sqrt{MgH})$  и параметры их достоверности приведены в табл. 1.

Расчетные зависимости и параметры их достоверности

Грунт	Общий характер зависимостей. Расчетные зависимости	Коэффициент корреляции, $R$
		Сумма квадратов отклонений, $S$
Супеси пластичные	$w = a \cdot e^{b \cdot \sqrt{MgH}} + c$ $w = 3.13 \cdot e^{-0.09 \cdot \sqrt{MgH}} + 22.08$	$\frac{0,999}{0,12}$
Супеси пылеватые	$w = 5.98 \cdot e^{-0.06 \cdot \sqrt{MgH}} + 16.04$	$\frac{0,999}{0,16}$
Пески пылеватые	$w = 3.13 \cdot e^{-0.1 \cdot \sqrt{MgH}} + 12.38$	$\frac{1,0}{0,07}$
Пески пылеватые	$\rho_d = a \cdot \lg(\sqrt{MgH} + b) + c$ $\rho_d = 0.67 \cdot \lg(\sqrt{MgH} + 1.54) + 17.6$	$\frac{0,995}{0,204}$
Супеси пылеватые	$\rho_d = 0.93 \cdot \lg(\sqrt{MgH} + 10.16) + 19.75$	$\frac{0,999}{0,066}$
Супеси пластичные	$\rho_d = 0.41 \cdot \lg(\sqrt{MgH} + 4.05) + 24.64$	$\frac{0,975}{0,19}$

Не менее существенной является и проблема минимизации энергетических затрат на уплотнение грунтовых оснований. Исследования [3, 5] показали, что увеличение массы трамбовки зачастую обеспечивает не только требуемую степень уплотнения (глубину отпечатка) с минимальными энергетическими затратами, но и равномерное распределение плотности по глубине. В качестве расчетных предложены следующие зависимости:

$$S = \frac{\rho_d^{mp} - \rho_d}{\rho_d^{mp}} \cdot H_{ym}; \quad (7)$$

$$S = \sqrt{\frac{8MH(1-v^2) \cdot w}{\pi \cdot d_{mp}^2 \cdot E}}, \quad (8)$$

где  $\rho_d^{mp}$  и  $\rho_d$  – плотность сухого грунта соответственно до и после уплотнения,  $\frac{г}{см^3}$ ;  $H_{yn}$  – глубина уплотнения, м;  $M$  – масса трамбовки, т;  $H$  – высота сброса трамбовки, м;  $w$  – безразмерный коэффициент;  $d_{mp}$  диаметр трамбовки, м;  $E_0$  – модуль деформации уплотняемого слоя грунта, МПа.

Линейная зависимость между глубиной отпечатка  $h_{omn}$  и количеством ударов ( $n$ ) характерна в основном при уплотнении грунтов природного сложения и намывных уплотнившихся. Для свежееотсыпанных грунтовых массивов глубина отпечатка на 20–25 % больше при одном и том же числе ударов.

По результатам экспериментальных исследований П.С. Пойта [3] предложил расчетную зависимость для глубины отпечатка  $S$  в зависимости от количества ударов  $n$ :

$$S = n \cdot ctg\varphi + 42.0, \quad (9)$$

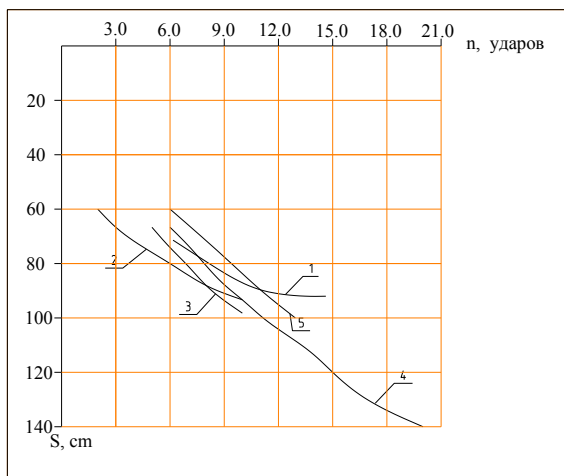
где  $\varphi$  – угол наклона прямой, характеризующей зависимость затрат энергии на уплотнение грунта  $A$  от глубины отпечатка  $h_{omn}$ .

Значение угла  $\varphi$  по данным [1, 3] зависит от вида уплотняемого грунта и массы трамбовки и для трамбовок массой до 15 т  $\varphi$  обычно не превышает  $25^\circ$ , но в зависимости от вида грунта он может изменяться в пределах –  $10 \div 45^\circ$ .

Однако следует отметить, что данный подход является достаточно приближенным, что подтверждается графиками зависимости  $S = f(n)$  и  $S = f(A)$ , т. е. связи глубины отпечатка  $S$  от количества ударов  $n$  в одной точке до уплотнения грунта до отказа ( $\leq 5$  см) и работы  $A$ , затрачиваемой на создание этого отпечатка (рис. 3).

Аналогичные особенности характерны и для функциональных связей  $S = \varphi(A)$ . Расчетные зависимости  $S = f(n)$  и  $S = \varphi(A)$  приведены в табл. 2.

*a*



*б*

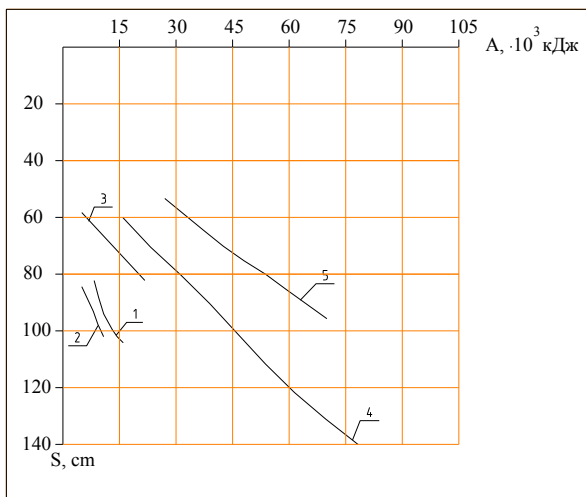


Рис. 3. Графики зависимости глубины отпечатка  $S$  от количества ударов  $n$  (*a*) и от работы  $A$ , затрачиваемой на его формирование (*б*):  
1 – пески; 2 – супеси; 3 – глины; 4 – суглинки; 5 – суглинки и глины пластичные и водонасыщенные

Таблица 2

## Расчетные зависимости

Грунт	Общий характер зависимостей. Расчетные зависимости	Коэффициент корреляции, $R$
		Сумма квадратов отклонений, $S$
	$S = a \cdot \lg(n + b) + c$	
Пески	$S = 36.12 \cdot \lg(n + 3.3) - 0.3$	$\frac{1,0}{0,869}$
Супеси	$S = 14.67 \cdot \lg(n - 4.2) + 60.8$	$\frac{0,996}{1,51}$
Глины	$S = 65.6 \cdot \lg(n + 2.9) - 69.5$	$\frac{0,996}{2,51}$
Суглинки	$S = 122.2 \cdot \lg(n + 10.9) - 278.4$	$\frac{1,0}{1,63}$
Суглинки и глины пластич- ные	$S = 467 \cdot \lg(n + 70.2) - 1.9 \cdot 10^{-3}$	$\frac{0,997}{2,44}$
	$S = a \cdot \lg(A + b) + c$ , $S = a \cdot e^{b \cdot A} + c$ , $S = a \cdot A^b + c$	
Пески	$S = 53.08 \cdot \lg(A + 12.2) - 74.9$	$\frac{0,986}{3,56}$
Супеси	$S = 0.025 \cdot A^{2.82} + 83.5$	$\frac{0,998}{0,74}$
Глины	$S = 66.4 \cdot e^{0.02 \cdot A} - 12.0$	$\frac{0,998}{1,22}$
Суглинки	$S = 5.76 \cdot A^{0.68} + 22.3$	$\frac{0,999}{2,45}$
Суглинки и глины пластич- ные	$S = 0.11 \cdot A^{1.45} + 41.8$	$\frac{0,948}{2,26}$



Вместе с тем следует отметить, что для уплотнения грунта до требуемой плотности  $\rho_d^{mp}$  можно выбрать и трамбовки другого диаметра  $d_{mp}^i$ , но в этом случае изменятся энергозатраты на уплотнение. Например, при большем  $d_{mp}^i$  необходимо будет выполнить больше ударов в каждой точке, а зона уплотнения практически не увеличивается. При меньшем  $d_{mp}$  требуемая плотность может быть достигнута и при меньшем количестве ударов, т. е. снижении энергозатрат, но при этом зона уплотненного грунта резко уменьшается.

Результаты исследований позволили построить расчетные номограммы для определения диаметра трамбовки  $d_{mp} = f(H_{yn}, l_{omn}, h_{omn})$  и расстояний между точками трамбования  $l = \varphi(\rho/\rho_{mp}, H_{yn}, h_{omn})$  (рис. 4 и 5).

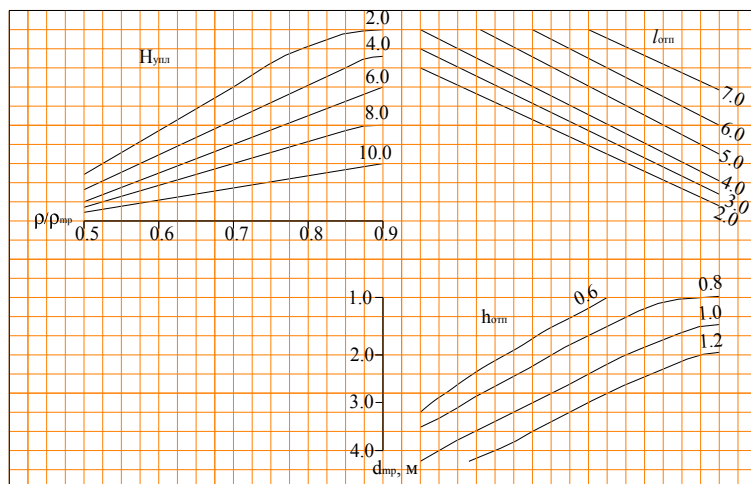


Рис. 4. Номограмма для определения диаметра трамбовки

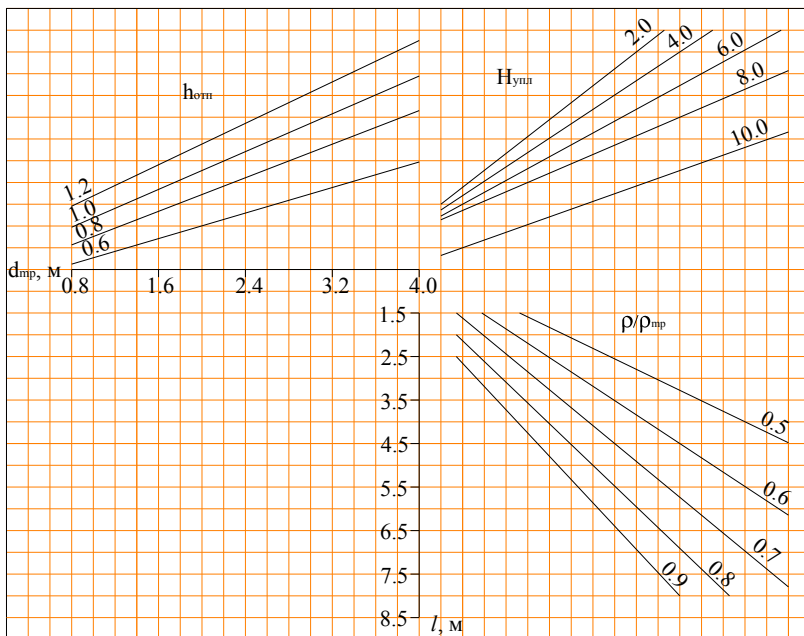


Рис. 5. Номограмма для определения расстояния между точками трамбования

На основе анализа имеющихся исследований и производственного опыта [1– 5] составлена таблица рекомендуемых конструктивно – технологических параметров процесса уплотнения грунтовых оснований тяжелыми трамбовками (табл.3).

Проведенные исследования позволяют отметить, что оптимизация конструктивных параметров трамбовок ( $d_{\text{мр}}$ , формы подошвы,  $M$ ) и технологических ( $H$ ,  $l$ ) и процесса уплотнения требует полного и достоверного учета как инженерно – геологических условий, так и конструктивно – технологических параметров и факторов.

Таблица 3

Рекомендуемые конструктивно – технологические параметры  
уплотнения грунтовых оснований

№ № п/ п	Толщина уплотня- емого слоя, $H_{уп}$ , м		Массы грам- бовки $M$ , т	Ди- аметр грам- бовки, $d_{mp}$ , м	Вы- сота сбро- са, $H$ , м	Чис- ло уда- ров по од- ному сле- ду, $n$	Глуби- на от- печат- ка, $h_{отп}$ , м
	Глини- стые грунты	Песча- ные грун- ты					
1	2	3	4	5	6	7	8
1	до 2,0	до 2,2	до 2,5	до 1,2	6–8	12– 14	0,6–0,8
2	2,0–2,5	2,2–2,5	2,5–3,5	1,2–1,6	6–8	12– 14	0,6–0,8
3	2,5–3,0	2,5–3,5	3,5–5,5	1,6–1,8	6–8	12– 14	0,7–0,8
4	3,0–4,5	3,5–4,8	5,5–6,5	1,8–2,0	6–8	12– 14	0,8–0,9
5	4,5–6,0	4,8–6,9	6,5–10	2,0–2,4	8–10	10– 12	0,8–0,9
6	> 6,0	> 7,0	10,0– 15,0	2,4–3,5	8–10	8–10	0,9–1,0

Выявление взаимозависимости между диаметром  $d_{mp}$  и массой  $M$  трамбовки, исходной влажностью  $W$ , глубиной отпечатка  $h_{отп}$ , энергией удара  $\sqrt{MgH}$ , работой  $A$  и числом ударов  $n$ , расстоянием между точками уплотнения  $l$ , соотношением плотностей сухого грунта  $\rho_d^{фак} / \rho_d^{mp}$ , модулем деформации  $E_0$  позволили построить расчетные номограммы и разработать рекомендации по выбору оп-

тимальных конструктивно – технологических параметров уплотнения грунтовых оснований.

## Литература

1. Пойта, П.С. Влияние физико – механических свойств уплотняемого грунта на оптимальный диаметр трамбовок / П.С. Пойта // Строительство. – 2003. – №1. – С. 243–247.

2. Пойта, П.С. Оптимизация технологических параметров уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками / П.С. Пойта // Строительство и архитектура : Вестник БрГТУ. – 2003. – №1 (19). – С. 109– 110.

3. Пойта, П.С. Особенности формирования зоны уплотнения грунтов при уплотнении грунтового основания тяжелыми трамбовками / П.С. Пойта, П.В. Шведовский, Д.Н. Клебанюк // Матер. XVIII Межд. науч.-метод. семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовка инженерных кадров в Республике Беларусь» ПГУ, Новополоцк, 2012. – С. 189–196.

4. Грунтовые основания, уплотнение тяжелыми трамбовками. Порядок проектирования и устройства : ТКП 45-5.01-107-2008 (02250). – Введ. 08.09.2008. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2008. – 33 с.

5. Шведовский, П.В. Влияние конструктивных параметров и особенностей формы подошвы тяжелых трамбовок на формирование свойств грунтов в зоне уплотнения / П.В. Шведовский, П.С. Пойта, Д.Н. Клебанюк // Строительство и архитектура : Вестник БрГТУ. – Брест, 2013. – № 1, – С. 20–23.