

уровень надежности системы «основание - сооружение» возрастает более чем на 50%.

Расчеты, выполняемые по этим исходным данным, но с вариацией  $\sigma_{p_d}$  в диапазоне  $0,5 - 2,5 \text{ кН} / \text{м}^3$  показали, что расчетного уровня надежности  $H_p = 0,95$  можно достичь при  $V_{p_d} \leq 0,05$ .

Отсюда, при расчетах несущей способности оснований, уплотненных тяжелыми трамбовками, целесообразно введение в величину условного расчетного сопротивления грунта ( $R_0$ ) поправочного коэффициента  $K_n = 0,95$ , учитывающего влияние неоднородности грунтового основания.

**Заключение.** Повышение уровня надежности системы «основание - сооружение» наиболее эффективно обеспечивать за счет снижения коэффициента вариации внутреннего фактора системы, определяющего несущую способность (предельно допустимую деформацию), т.е. упрочнением уплотняемого грунтового основания и в первую очередь обеспечивая однородность грунтов. Технологическая сложность обеспечения однородности грунтов в зоне уплотнения определяет необходимость коррекции расчетной зависимости величины условного расчетного сопротивления грунта ( $R_0$ ), т.е. введения поправочного коэффициента, учитывающего неоднородность грунта в зоне уплотнения.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ермолаев, Н.Н. Надежность оснований сооружений / Н.Н. Ермолаев, В.В. Михеев. – Л.: Стройиздат, 1976 – 152 с.

2. Пойта, П.С. Исследование зоны уплотнения при применении тяжелых трамбовок / П.С. Пойта, А.Н. Тарасевич // Архитектура и строительные конструкции. – Новосибирск. – 1992. – С. 69–73.

3. Кандауров, И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве / И.И. Кандауров. – Л.: Стройиздат, 1988. – 271 с.

4. Проектирование и уплотнение грунтов оснований зданий и сооружений тяжелыми трамбовками / Е.Ф. Винокуров, В.Е. Еськов, В.Н. Лях, Л.И. Шевчук – Минск, 1997. – 36 с.

5. Грунтовые основания уплотненные тяжелыми трамбовками: ТКП 45-5.01-107-2008. – Минск: Минархстрой РБ, 2008 – 29 с.

6. Шведовский, П.В. Особенности оценки и прогноза изменчивости строительных свойств грунтов геомассива в пределах строительных площадок / П.В. Шведовский, П.С. Пойта, Д.Н. Клебанюк // Вестник БрГТУ. – 2012. – № 1: Строительство и архитектура – С. 82–85.

7. Болотов, В.В. Применение методов теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений / В.В. Болотов. – М.: Стройиздат, 1971 – 206 с.

8. Иванов, Л.В. О неоднородности и методах изучения и оценки строительных свойств грунтов ледникового комплекса / Л.В. Иванов // Тр. ЛИСИ. – Вып. 18. – Л.: Стройиздат, 1986. – С. 84–91.

9. Муллер, Р.А. К обоснованию величин коэффициента запаса при расчете фундаментов на устойчивость / Р.А. Муллер // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М.: МИСИ, 1976. – С. 15–22.

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

11. Пойта, П.С. Влияние физико-механических свойств уплотняемого грунта на оптимальный диаметр трамбовки / П.С. Пойта // Строительство. – Минск. – 2003. – № 1–2. – С. 243–247.

Материал поступил в редакцию 02.01.13

#### SHVEDOVSKY P.V., POYTA P.S., KLEBANIUK D.N. Influence and the accounting of heterogeneity of consolidation of the soil bases heavy tampers on level of reliability of basis construction system

Need of introduction in the size of conditional settlement resistance of soil of the correction coefficient considering influence of heterogeneity of the soil basis condensed with heavy tampers is proved.

УДК 624.15+624.131.6:561.5

Пойта П.С., Шведовский П.В., Клебанюк Д.Н.

### ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМЫ ПОДОШВЫ ТЯЖЕЛЫХ ТРАМБОВОК НА ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ГРУНТОВ В ЗОНЕ УПЛОТНЕНИЯ

**Введение.** Опыт проектирования строительства искусственных оснований зданий и сооружений методами интенсивного ударного уплотнения показывает, что повышение экономичности принятых решений, снижение трудоёмкости при их возведении может быть достигнуто за счёт совершенствования как конструктивных, так и технологических параметров, определяющих выбранную технологию. Правильно выбранные конструктивно-технологические параметры позволяют получить качественное основание при минимальных энергозатратах, а следовательно, снижают сроки строительства и стоимость работ [1].

**Анализ и методика исследований.** Экспериментальные данные [2, 3, 4, 5] свидетельствуют о целесообразности увеличения массы трамбовок, что позволяет получить не только требуемую осадку поверхности грунта, с меньшими энергетическими затратами, но и более равномерное распределение плотности по глубине уплотняемой толщи.

Однако трамбовка одной и той же массы может иметь не только различные размеры подошвы, но и различные ее формы, что обуславливает совершенно разное статическое давление на грунт. А как показывает практика, чем меньше статическое давление на грунт, тем больше ударов в одной точке необходимо выполнять для достижения грунтом требуемой плотности. Малые размеры подошвы трамбовки не только затрудняют производство работ, но и, при до-

стижении определённого предела по диаметру, делают эти работы практически невозможными из-за выпора грунта.

Следовательно, оптимальная площадь основания трамбовки будет лишь в том случае, когда работа ( $N_{фак}$ ), затрачиваемая на уплотнение грунта, будет минимальной ( $N_{min}$ ), т.е.

$$N_{фак} = M \cdot H \cdot \frac{B}{A} \cdot n \in N_{min}, \quad (1)$$

где  $M$  – масса трамбовки, принимаемая с учётом грузоподъёмности механизма;  $H$  – высота сбрасывания трамбовки;  $B$  – площадь участка, в пределах которого требуется уплотнение грунтов;  $A$  – площадь основания трамбовки;  $n$  – число ударов трамбовки в одной точке.

Как было отмечено исследованиями [2, 5, 6, 7] одним из важнейших факторов, определяющих однородность уплотнённого основания, является расстояние между точками уплотнения. Оптимизация этого фактора всегда обеспечивает высокое качество искусственного основания при минимальных трудозатратах.

Из рисунка 1 видно, что расстояние между точками трамбования зависит от угла наклона секущей прямой ( $\varphi$ ) к горизонту. Мощность зоны уплотнения в этих условиях изменяется в пределах  $l = 4,5-7,5$  м, ширина периферийной зоны, за пределы центральной зоны (столба), – в пределах  $r = 2,6-4,0$  м, а угол наклона секущей прямой к горизон-

ту варьирует в пределах  $\varphi_i = 22^\circ - 50^\circ$ , при этом, при больших значениях угла  $\varphi$  обеспечивается более качественное уплотнение грунта как по глубине, так и по площади. Кроме того, увеличение угла  $\varphi$  позволяет увеличить расстояние между точками трамбования ( $b$ ), минимизирующие трудозатраты работ по уплотнению. Вместе с тем [1] отмечено, что влияние угла  $\varphi$  на величину ( $\epsilon$ ) не всегда столь существенно, как влияние других факторов, что связано с особенностями формирования центральной зоны (столба) уплотнённого грунта, развитие периферийной зоны уплотнения и взаимодействия периферийных зон. На рисунке 2 приведена схема формирования зоны уплотнения и направления нормалей к площадкам главных максимальных деформаций сжатия при уплотнении оснований тяжёлыми трамбовками с круглой плоской подошвой.

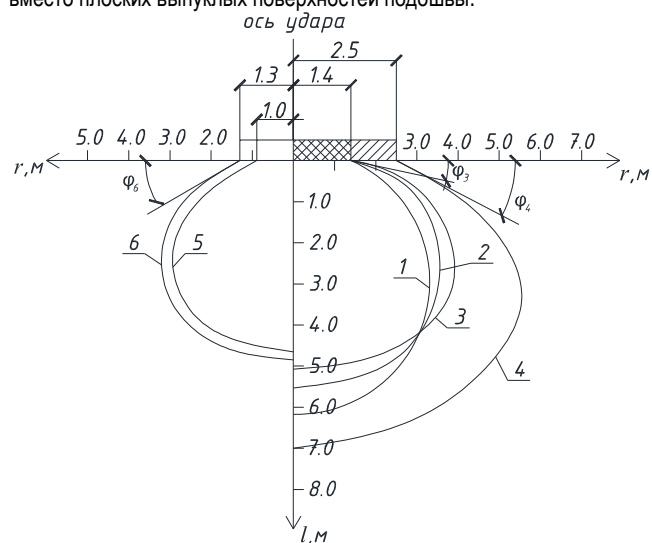
Чётко видно, что в зоне уплотнения наблюдается в основном радиальное направление нормалей к площадкам главных деформаций сжатия, а это указывает на преобладание радиальных деформаций над вертикальными, т.е. интенсивные удары таких трамбовок обуславливают на начальном этапе уплотнения сжатие центральной зоны (столба) грунта в области подошвы трамбовки, с последовательным радиальным его боковым расширением, которое и вызывает радиальное сжатие грунта в периферийной зоне.

При этом если плотность грунта периферийной зоны относительно высокая, то радиальное сжатие может сопровождаться выпором грунта. При низкой естественной плотности грунта влияние радиального распора на деформации периферийной зоны будет существенно менее значимо.

Всё это и определяет основные факторы механизма деформации периферийной зоны: естественная плотность грунта; степень радиального расширения и уплотнения грунта в центральной зоне; величины сил трения на контакте центральной и периферийной зон.

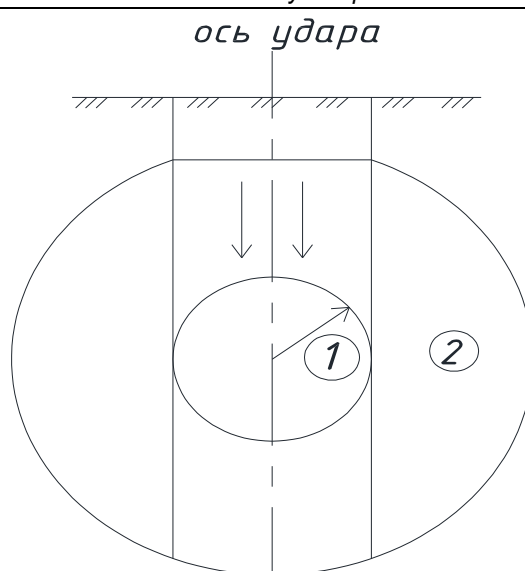
**Результаты эксперимента и их обсуждения.** Имеющиеся исследования [1–8] в целом позволяют определить эти закономерности. На рисунке 3 приведены графики взаимосвязи  $d_{mp}$  со свойствами уплотняемых грунтов и технологическими параметрами.

Анализ графиков взаимосвязи (рис. 3) позволил определить предпочтительный диапазон взаимосвязей требуемых свойств грунтовых оснований и требуемых свойств грунтовых оснований и конструктивно-технологических параметров тяжёлых трамбовок. Характер взаимосвязей  $S_{cm} = f(d_{mp})$ ,  $\sqrt{Mgn} = \varphi(d_{mp})$ ,  $m = \psi(d_{mp})$  и  $b = \xi(d_{mp})$  позволяет сделать вывод, что оптимизация процесса уплотнения может быть ориентирована и на выбор форм поверхностей подошвы трамбовок, т.е. использование вместо плоских выпуклых поверхностей подошвы.

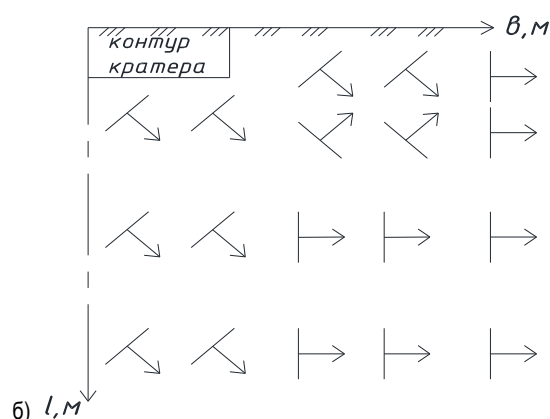


1, 2, 3 – при уплотнении трамбовками  $\varnothing 2,8$  м естественных оснований, сформированных однородными связными грунтами; 4 –  $\varnothing$  трамбовки 5 м, при наличии прочного подстилающего слоя песчаных грунтов; 5 и 6 – соответственно для трамбовок  $\varnothing 2$  и  $2,6$  м на намывных территориях из песчаных грунтов

Рис. 1. Контуры зон уплотнения



а)



б)

1 – центральная зона; 2 – периферийная зона уплотнения

Рис. 2. Схема формирования зоны уплотнения (а) и направление нормалей к площадкам главных максимальных деформаций сжатия (б)

В качестве выпуклых поверхностей подошвы трамбовок рассмотрены два варианта – сфера вращения и сфероид (рис. 4).

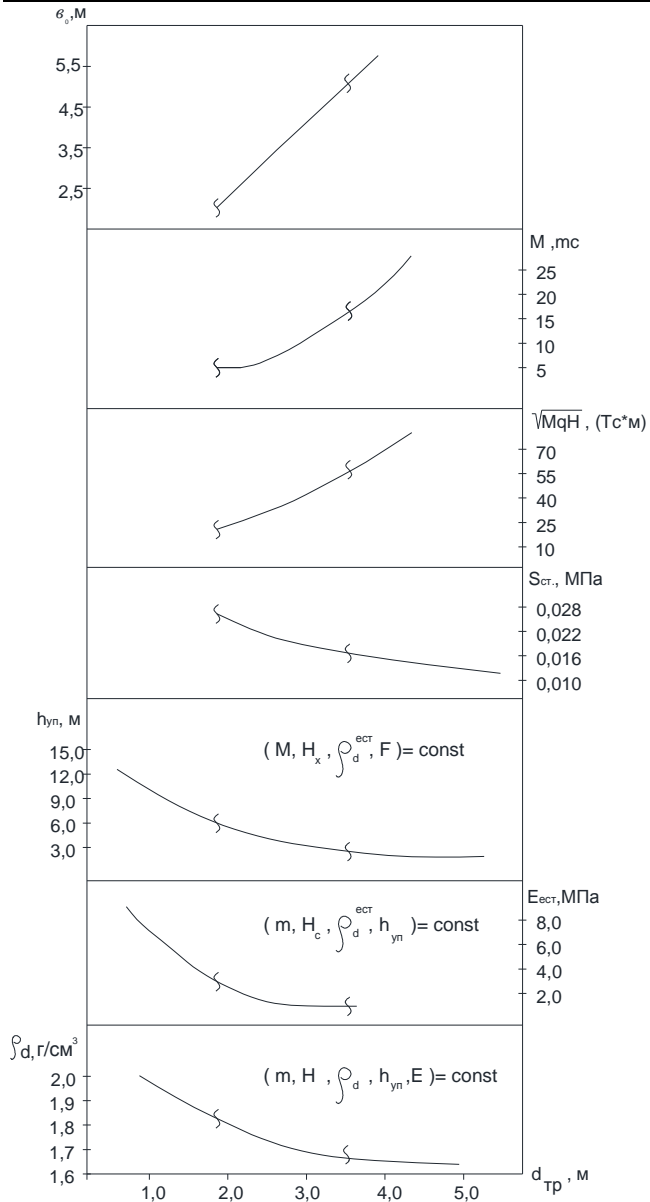
Анализ схем (рис. 5) формирования зон уплотнения при использовании тяжёлых трамбовок с различными очертаниями подошв позволяет отметить, что как центральной зоне (столбу) грунта, так и периферической зоне характерны специфические особенности напряженно-деформированного состояния грунтов.

Особенности формирования контуров зон уплотнения грунта и изменения углов наклона ( $\varphi_i$ ) секущей прямой к горизонту для трамбовок широко используемых в практике (круглая плоская подошва), и предлагаемых трамбовок с выпуклой сферической и выпуклой сфероидной подошвами показаны на рис. 6.

Отсюда можно сделать вывод, что оптимальным вариантом уплотнения грунтов тяжёлыми трамбовками с технологической точки зрения для обеспечения максимальной глубины зоны уплотнения с достаточно однородной степенью уплотнения является двухэтапное уплотнение: в начальный период – трамбовками с выпуклой сфероидной подошвой, а затем – трамбовками с выпуклой сферической подошвой.

Бесспорно, это требует создания специальных конструкций тяжёлых трамбовок.

Отметим, что некоторым аналогом тяжёлой трамбовки, которая в некоторой мере не допускает выпора грунта в периферической зоне уплотнения, является конструкция трамбовки, рекомендуемая ТКП 45-5 01-107-2008 [9] (приложение Г) (рис. 7). Она состоит из цилиндрической емкости (1), заполненной в нижней части (2) забетонированными металлическими отходами а в верхней – тяжёлым бетоном. К боковой поверхности крепится фланец уширения (4) (рис. 7а).



[ $M$  – масса трамбовки;  $h_{уп}$  – мощность уплотняемой зоны;  $\epsilon_0$  – расстояние между точками трамбования,  $MgH$  – энергия одиночного удара;  $E_{ест}$  – модуль деформации,  $S_{ст}$  – статическое давление на грунт]

Рис. 3. График взаимосвязи диаметров трамбовок со свойствами уплотняемых грунтов  $d_{тр} = f(P_d^{mp}, E_{ест})$  и технологическими параметрами  $d_{тр} = \varphi(h_{уп}, S_{ст}, M, H, \sqrt{MgH}, \epsilon_0)$

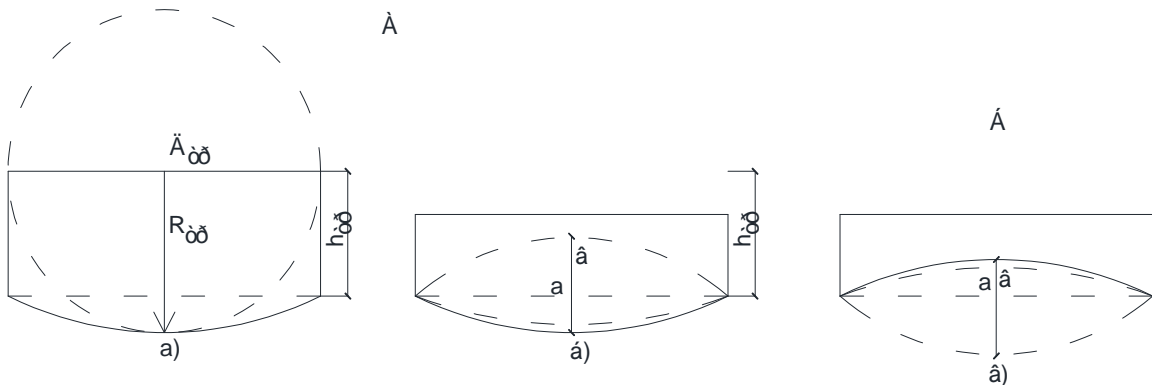


Рис. 4. Принципиальные схемы трамбовок: А) с выпуклой подошвой (сферическая - а и сфероидная - б); Б) с выпуклой сфероидной подошвой - в)

Принципиальным отличием является форма фланца: - плоский заменён на сферический шестисекционный, при этом конструкция трамбовки позволяет обеспечить переход от выпуклой формы фланца - к вогнутому (рис. 76).

Изменённая форма подошвы трамбовки определяет необходимость корректировки расчётных зависимостей по конструктивно-технологическим параметрам трамбовок.

Давление на грунт соответственно будет определяться по зависимостям:

- для трамбования с выпуклыми подошвами вариант а)

$$A_{mp} = 2 \cdot \pi \cdot R_{mp}^2 - 2 \cdot \pi \cdot R_{mp} \cdot h_{mp}, \quad (2)$$

где  $h_{mp}$  – высота трамбовки и после соответствующих преобразований

$$A_{mp} = 2 \cdot \pi \cdot D_{mp} (D_{mp} - 2 \cdot h_{mp}); \quad (3)$$

$$P_{cm} = \frac{M_{mp}}{A_{mp}} = \frac{2 \cdot m_{mp}}{\pi \cdot D_{mp} \cdot (D_{mp} - 2 \cdot h_{mp})}; \quad (4)$$

вариант б)

$$A_{mp} = 2 \cdot \pi \cdot a^2 + \pi \cdot \frac{b^2}{\epsilon} \cdot \ln \frac{1+\epsilon}{1-\epsilon}, \quad (5)$$

где  $\epsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$ ;

$a$  и  $b$  – большая и малая оси сфероида (сплюснутого эллипсоида) вращения вокруг малой оси, при этом  $a = D_{mp}$ .

После соответствующих преобразований имеем:

$$A_{mp} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{mp}^2 + \frac{\pi \cdot b_0^2}{\sqrt{D_{mp}^2 - 4 \cdot b_0^2}} \cdot \ln \sqrt{1 - \frac{4 \cdot b_0^2}{D_{mp}^2}}) \quad (6)$$

с учётом незначительной величины второго составляющего –

$$A_{mp} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{mp}^2 + \frac{\pi \cdot b_0^2}{\sqrt{D_{mp}^2 - 4 \cdot b_0^2}}), \quad (7)$$

где  $b_0$  – максимальная высота выгиба подушки трамбовки.

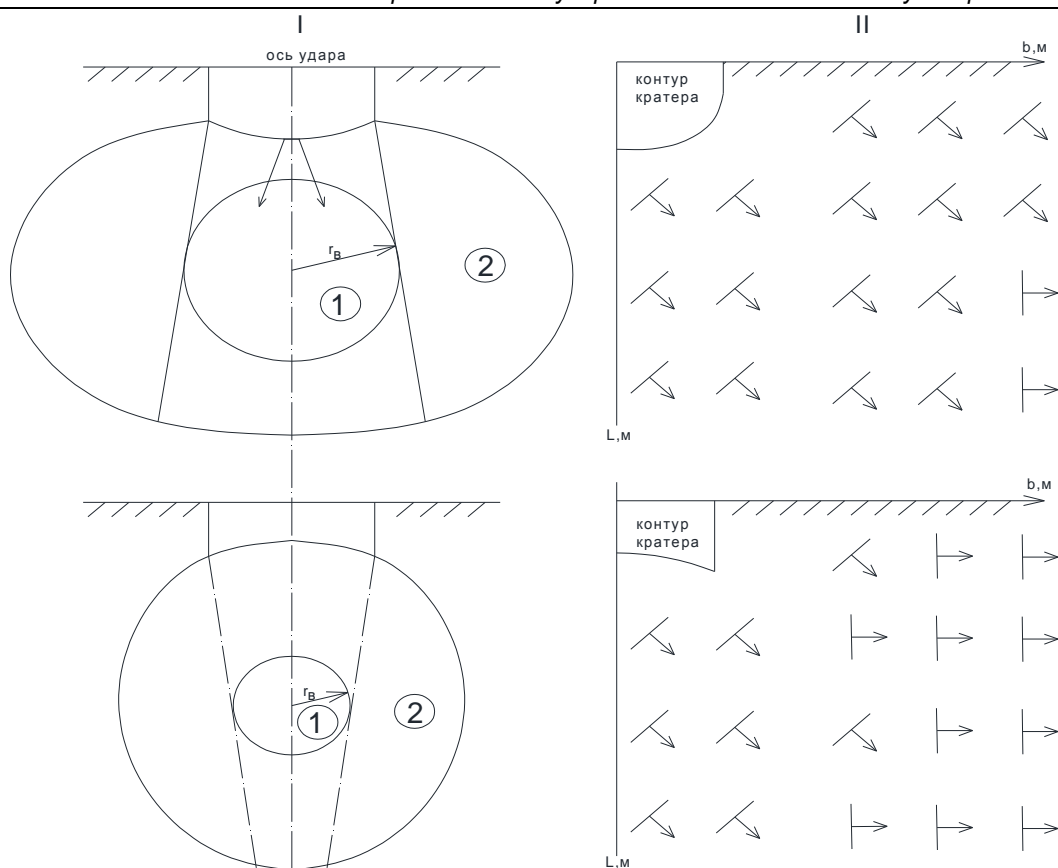
Тогда соответственно –

$$P_{cm} = \frac{M_{mp}}{A_{mp}} = \frac{4 \cdot m_{mp}}{\pi \cdot (D_{mp}^2 + \frac{\pi \cdot b_0^2}{\sqrt{D_{mp}^2 - 4 \cdot b_0^2}})} \quad (8)$$

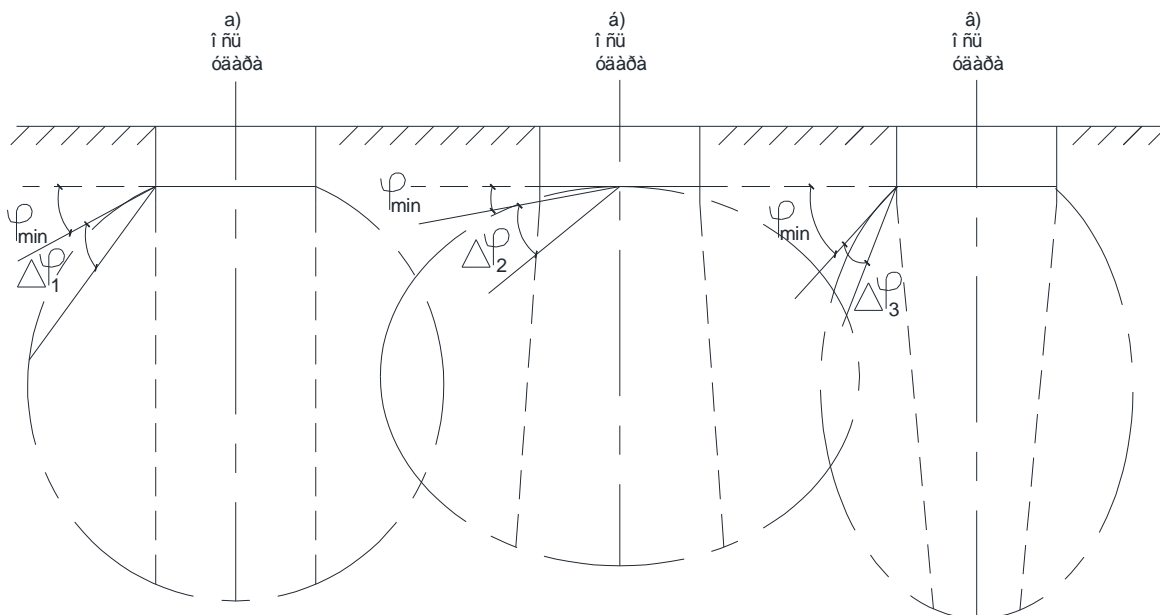
Для выгнутой подошвы трамбовки (вариант в) расчётная зависимость будет аналогична зависимости (8). Но с другой стороны, согласно исследованиям [11], для трамбовок с параболическими нагрузками –

$$P_{cm} = \frac{M_{mp}}{2 \cdot v \cdot \pi \cdot h^2} \cdot \exp(-\frac{D_{mp}^2}{8 \cdot v \cdot h^2}), \quad (9)$$

где  $h$  – некоторая постоянная.



а) для трамбовок с выпуклой сферической подошвой; б) с вогнутой сферической подошвой; 1 – центральная, 2 – периферическая зоны уплотнения  
**Рис. 5.** Схема формирования зон уплотнения (I) и направления нормалей к площадкам главных максимальных деформаций сжатия (II)



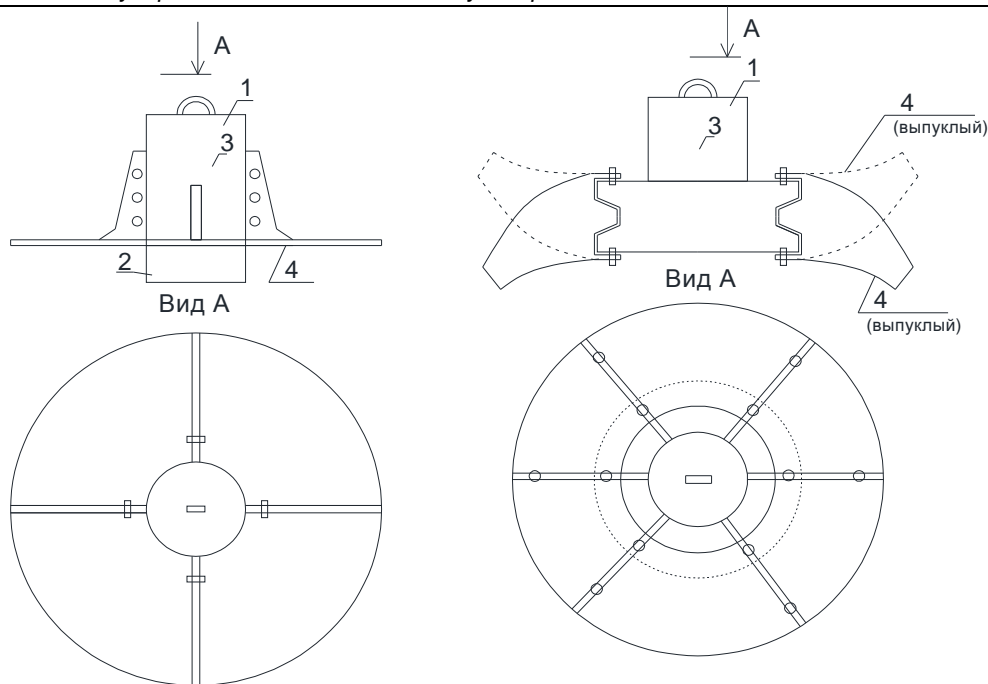
а) для трамбовок с круглой плоской, б) с выпуклой сферической и в) вогнутой сфероидной подошвой  
**Рис. 6.** Контуры зон уплотнённого грунта и углов наклона ( $\varphi_i$ ) секущей прямой к горизонту

Так как непосредственно под подошвой трамбовки –

$$\frac{\sigma_z}{P_0} = \frac{R_{mp}^2}{2 \cdot \nu \cdot h^2}, \quad (10)$$

где  $P_0$  – среднее давление под подошвой, то тогда –

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_{mp}^2}{\left(\frac{\sigma}{P_0}\right) \cdot 2 \cdot \nu}}. \quad (11)$$



а) рекомендуемая по ТКП [9]; б) предлагаемая авторами  
**Рис. 7.** Конструктивная схема тяжёлых трамбовок

Объект исследований, грунт	M, т·с	H, м	h <sub>ум.</sub> , м	ρ <sub>d</sub> <sup>есм.</sup> , т/м <sup>3</sup>	E, МПа	ρ <sub>d</sub> <sup>мп.</sup> , т/м <sup>3</sup>	d <sub>мп.</sub> , м		
							с плоской подошвой		с криволинейной подошвой
							принятый	по ТКП [9]	
Насыпь Загорской ГЭС	13	12	5,5	1,62	1,0	1,98	2,8	2,84	2,60
	15	15	5,5	1,62	1,0	1,98	2,8	4,09	3,7
Насыпь Кайшадарской ГАЭС	15	15	6,0	1,63	1,4	1,96	2,8	3,4	3,1
Аллювиальные отложения надпойменной террасы	25	25	7,8	1,72	3,3	1,94	3,95	5,0	4,6
Насыпные глинистые грунты	3,5	6,0	3,2	1,49	1,3	1,75	1,8	1,5	1,35
	5,5	6,0	4,25	1,53	0,95	1,78	2,0	1,8	1,65
Супесь пластичная	12	10	6,0	1,4	6,0	1,50	3	2,3	2,1
Стройплощадка капролактама Гродненского ПО "Азот"	7	12	3,0	1,66	4,2	1,79	2,0	1,92	1,75

Учитывая, что  $P_0 = 2,55P$  и приняв  $\frac{\sigma_z}{P} \approx 1$ , получаем

$$h = \sqrt{\frac{0,3 \cdot D_{mp}^2}{\nu}} \quad (12)$$

Откуда после соответствующих подстановок и преобразований –

$$P_{cm}^{max} = \frac{4,16 \cdot M_{mp}}{\pi \cdot D_{mp}^2} \quad (13)$$

В соответствии с исследованиями [10] осадка от параболической нагрузки –

$$S = \frac{2 \cdot P_{max} \cdot D_{mp}}{\pi \cdot E} \cdot (1 - \nu^2) \quad (14)$$

Учитывая (14), имеем:

$$S_{cm} = \frac{8,32 \cdot M_{mp}}{\pi^2 \cdot D_{mp} \cdot E} \cdot (1 - \nu^2) \quad (15)$$

Подставив  $S_{cm}$  в расчётные уравнения  $S_{дин}$  и  $\Delta_{mp}$ , получим:

$$\frac{P_d^{mp} - P_d}{P_d^{mp}} \cdot l = \sqrt{\frac{16,64 \cdot M \cdot H \cdot (1 - \nu^2)}{\pi^2 \cdot d_{mp} \cdot E}} \quad (16)$$

откуда –

$$d_{mp} = \frac{1,75 \cdot M \cdot H \cdot (1 - \nu^2)}{\left(\frac{P_d^{mp} - P_d}{P_d^{mp}}\right)^2 \cdot E} \quad (17)$$

Сопоставление диаметров трамбовок с плоской формой подошвы и криволинейной приведены в таблице 1.

**Заключение.** Изменение угла наклонной секущей ( $\varphi$ ) обуславливает возможность варьирования расстоянием между точками трамбовки, и увеличение  $\varphi$  позволяет увеличить это расстояние.

Кроме того, при более высоких значениях угла  $\varphi$  обеспечивается более однородное уплотнение грунта по всей глубине и по площади.

Обеспечение максимальной глубины зоны уплотнения с достаточно однородной степенью уплотнения может быть достигнуто за счёт внедрения двухэтапного технологического процесса и специальных конструкций трамбовок – с вогнутой сферической и выпуклой сферической подошвой.

Сравнительный анализ диаметров трамбовок, применяемый в практике и определённый по действующим нормативным документам [9] и согласно предложенной методике, показывает, что обеспечить требуемые характеристики грунтовых оснований позволяют трамбовки меньшего диаметра, но с криволинейной подошвой.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пойта, П.С. Оптимизация технологических параметров уплотнения грунтов тяжёлыми трамбовками / П.С. Пойта // Вестник БГТУ. – 2003. – №1 (19): Строительство и архитектура. – С. 109–110.
2. Гарицелов, М.Ю. Интенсивное ударное уплотнение насыпи из тугопластичных грунтов при строительстве ГАЭС / М.Ю. Гарицелов, А.И. Юдкевич, М.С. Петров // Энергетическое строительство. – 1986. – №6. – С. 15–19.
3. Шве́ц, В.Б. Уплотнение грунтов оснований тяжёлыми трамбовками / В.Б. Шве́ц. – М.: Росстройиздат, 1958. – 162 с.
4. Пойта, П.С. Особенности формирования зоны уплотнения грунта при уплотнении грунтового основания тяжёлыми 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 Республице Беларусь» ПГУ. – Новополоцк, 2012.

5. Клебанюк, Д.Н. Особенности процесса распределения давлений и напряжений при уплотнении неоднородных грунтовых оснований тяжёлыми трамбовками / Д.Н. Клебанюк, А.Ю. Дроневи́ч, П.В. Шведовский, П.С. Пойта // Матер. XVIII Межд. науч.-метод. семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовка инженерных кадров в Республице Беларусь» ПГУ. – Новополоцк, 2012.
6. Ляпов, Г.М. Определение динамической сжимаемости грунтов / Г.М. Ляпов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1966. – №3. – С. 27–29.
7. Вуцель, В.И. Интенсивное динамическое уплотнение грунтов / В.И. Вуцель, Ю.К. Зарецкий, М.Ю. Гарицелов // Энергетическое строительство за рубежом. – 1983 – № 4. – С. 39–41.
8. Хорошун, Л.П. К теории изотропного деформирования упругих тел со случайными неоднородностями / Л.П. Хорошун // Прикладная механика. – 1967. – Т.3. – Вып. 9. – С. 14–19.
9. Грунтовые основания уплотнённые тяжёлыми трамбовками: ТКП 45-5301-107-2008(02250). – Мн.: Минархстроительства РБ. – 29 с.
10. Грицук, М.С. Рациональные конструкции плитных фундаментов / М.С. Грицук – Брест: БрГТУ, 1997. – 218 с.
11. Кандауров, И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве / И.И. Кандауров. – Л.: Стройиздат, 1988 – 218 с.

Материал поступил в редакцию 02.01.13

#### POYTA P.S., SHVEDOVSKY P.V., KLEBANIUK, D.N. Influence of design data and features of a form of a sole of heavy tampers on formation of properties of soil in a consolidation zone

The influence analysis structurally – technology factors on feature of formation of a zone of consolidation is made. The new design of heavy tampers is offered.

УДК 624.15+624.131.6:561.5

**Клебанюк Д.Н., Пойта П.С., Шведовский П.В.**

### ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ УПЛОТНЕНИИ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ ТЯЖЁЛЫМИ ТРАМБОВКАМИ

**Введение.** Исследования и производственный опыт [1, 2, 3, 4] показывают, что при поверхностном уплотнении грунтовых оснований, наиболее целесообразным и эффективным является применение тяжёлых трамбовок, что обусловлено большой остаточной осадкой грунта в отпечатке, при одних и тех же энергетических затратах, и равномерном распределении плотности грунта по глубине и площади уплотняемой толщи.

При этом бесспорно, что только полный и достоверный учёт основных закономерностей динамического уплотнения грунтовых массивов позволяет обосновать такой вариант производства работ, при котором достигается наибольший эффект.

Экспериментальными исследованиями [1, 3, 4] установлено, что параметры зоны уплотнения во многом определяются естественным состоянием грунта, формой и площадью трамбовки.

**Анализ и методика исследований.** Исследованиями Пойты П.С. [4] убедительно доказано, что изменяя конструктивно форму подошвы трамбовки можно управлять параметрами зоны уплотнения и характеристиками грунтов уплотняемой толщи. Эксперименты, проведённые им [3] на ряде объектов западного региона Республики по уплотнению грунтовых оснований тяжёлыми трамбовками с плоской и ступенчатой подошвами, позволили выявить следующие особенности (рис. 1).

Зона уплотнения грунтов трамбовкой (10 ударов) с плоской подошвой распространялась на глубину до 6,1 м ( $2,5d_{mp}$ ), а максимальное уширение 7,0 м ( $3,5d_{mp}$ ) находилось на 2,5 м ( $1,25d_{mp}$ ). Соответственно для трамбовки со ступенчатой подошвой: мощность зоны

уплотнения – 6,4 м ( $3,1d_{mp}$ ); максимальное уширение – 5,3 м ( $3,4d_{mp}$ ) на глубину – 3,0 м ( $1,5d_{mp}$ ). Аналогичная картина формирования зоны уплотнения и при пяти ударах трамбовок в одной точке.

Всё это позволяет сделать вывод, что при мощности слабого грунта до 5 м эффективно применение трамбовки с плоской подошвой, а при большей мощности целесообразно применение трамбовок со ступенчатой подошвой, что позволяет увеличить глубину зоны уплотнения до 6,0–7,0 м.

Отмечена также однородность уплотнения как песчаных грунтов, так и пылевато-глинистых, при этом степень водонасыщения грунтов особого значения не имела. Им же отмечено, что глубина зоны уплотнения во многом определяется наличием прочного подстилающего слоя грунта.

Бесспорно, формируемая глубина зоны уплотнения будет оказывать влияние и на диаметр зоны уплотнения, и на местоположение максимального её уширения.

В соответствии с рекомендациями, направленными на повышение эффективности процесса уплотнения [3, 4, 5], за счёт изменения формы подошвы трамбовок, нами были рассмотрены варианты перехода с плоских и ступенчатых подошв на сферические выпуклые и вогнутые.

На рис. 2 приведены расчетные схемы к определению параметров зоны уплотненного грунта для различных форм подошв трамбовки. Рассмотрим наиболее распространённую в производственной практике технологию уплотнения грунтов (рис. 2а); подошва трамбовки – плоская; зона уплотнения сформирована слабыми грунтами с относительно однородными свойствами.