

Кроме того, при более высоких значениях угла φ 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. Швеиц, В.Б. Уплотнение грунтов оснований тяжёлыми трамбовками / В.Б. Швеиц. – 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. Дроневиц, 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.

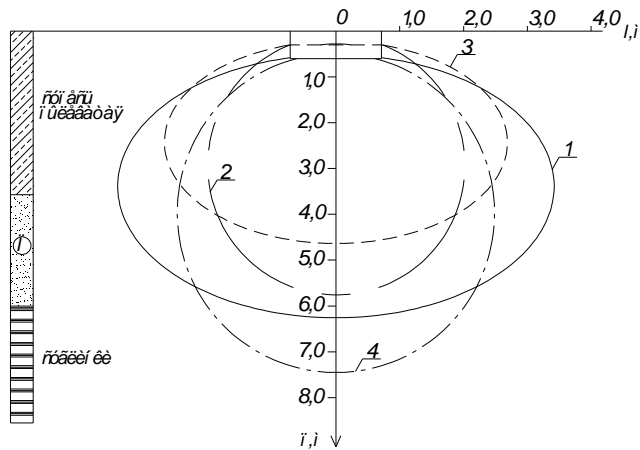
Всё это позволяет сделать вывод, что при мощности слабого грунта до 5 м эффективно применение трамбовки с плоской подошвой, а при большей мощности целесообразно применение трамбовок со ступенчатой подошвой, что позволяет увеличить глубину зоны уплотнения до 6,0–7,0 м.

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.



1 – с плоской подошвой (10 ударов); 2 – то же (5 ударов); 3 – со ступенчатой подошвой (10 ударов); 4 – то же (5 ударов)

Рис. 1. Параметры зон уплотнения трамбовками грунтов

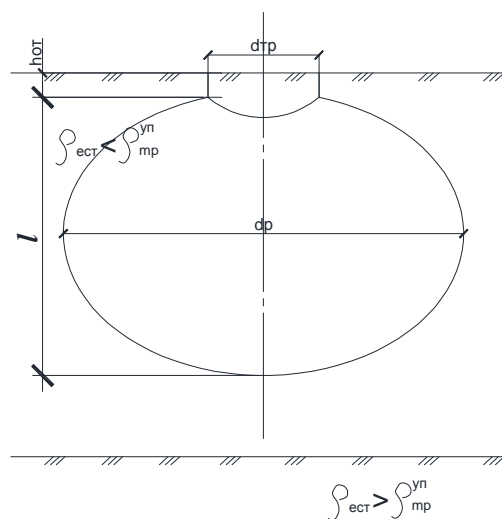
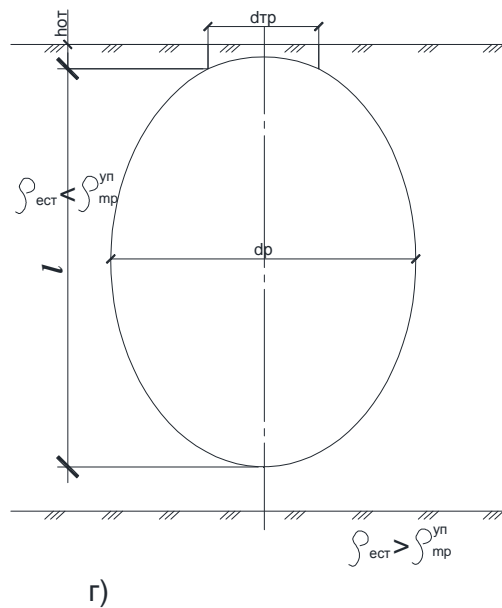
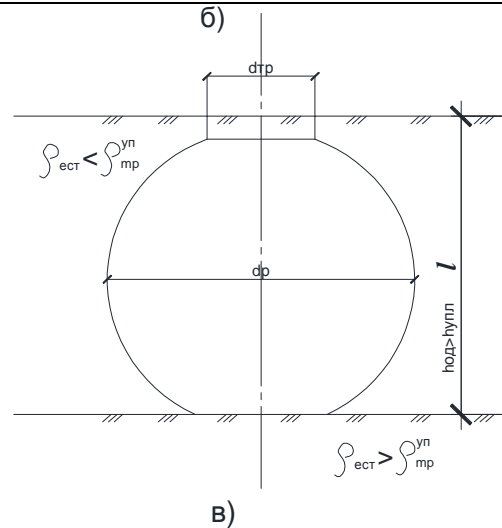
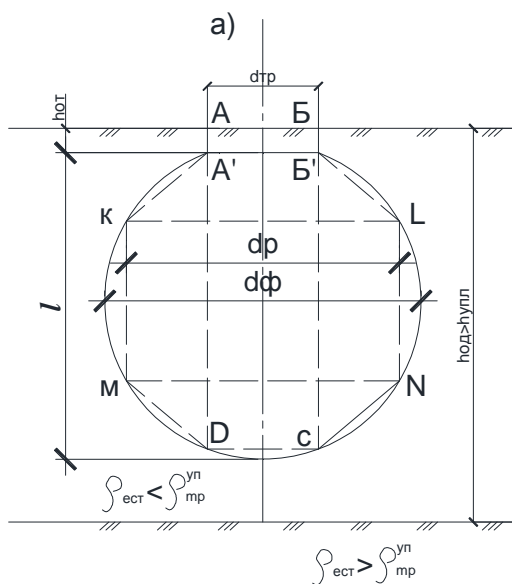
Расчетная зона уплотнения принята за сфероид, а диаметр уплотненной зоны определялся исходя из равенства объемов твердых частиц до уплотнения (объем цилиндра ABCD) и после уплотнения (объема цилиндра KLMN и двух усеченных конусов A'B'LK и DCNM) и соответственно получено:

$$d_p = 2\sqrt[3]{\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{3}\right)^2}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{3}\right)^2} - \frac{-(d_{mp})}{3}}, \quad (1)$$

где $q = 2 \cdot \left(\frac{-d_{mp}}{3}\right) - \frac{(-d_{mp}) \cdot (-d_{mp}^2)}{3} + k, \quad (2)$

$$k = 2 \cdot d_{mp}^2 \cdot l - d_{mp}^3 - \frac{2 \cdot d_{mp}^2 \cdot (l + h_{om}) \cdot (1 + l_{mp})}{1 + e_o}; \quad (3)$$

$$p = -\frac{(d_{mp})^2}{3} \cdot d_p + (-d_{mp}^2). \quad (4)$$



а) и б) при наличии прочного подстилающего слоя соответственно глубже и в зоне уплотнения для трамбовок с подошвой плоской формы; в) и г) при наличии прочного подстилающего слоя глубже зоны уплотнения соответственно для трамбовок с выпуклой и вогнутой формой подошвы

Рис. 2. Схемы к определению параметров зоны уплотнённого грунта

Явное решение расчетного уравнения (1) не получено и поэтому [2, 3] рекомендуется использовать программный комплекс «Математика».

Нами за основу принят этот же метод т.е. $V_{осм} = V_{упл.}$, но $V_{упл.}$ определено используя расчётную зависимость для тел вращения [7, 8].

Соответственно для сфероида –

$$V_{сф} = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3, \quad (5)$$

где r – радиус сферы вращения и с учётом особенностей формирования зоны уплотнения имеем:

$$V_{сф} = \frac{\pi \cdot (d_p - d_{mp})^3 \cdot \cos \varphi}{6(1 + e_{упл})}, \quad (6)$$

где $e_{упл}$ – коэффициент пористости грунта после уплотнения;

φ – угол наклона секущей.

Исходный объём грунта, равный объёму цилиндра ABCD, соответственно определяется зависимостью –

$$V_{ц} = \frac{\pi \cdot d_{mp}^2 \cdot (l + h_{ом})}{4(1 + e_0)}, \quad (6a)$$

где Δ – глубина отпечатка;

e_0 – коэффициент пористости грунта до уплотнения.

Приравняв объёмы (6 и 6а), получаем

$$\frac{\pi \cdot d_{mp}^2 \cdot (l + h_{ом})}{4(1 + e_0)} = \frac{\pi \cdot (d_p - d_{mp})^3 \cdot \cos \varphi}{6(1 + e_{упл})}, \quad (7)$$

откуда $d_p = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot d_{mp}^2 \cdot (l + h_{ом}) \cdot (1 + e_{упл})}{2 \cdot (1 + e_0) \cdot \cos \varphi}} + d_{mp}$. (8)

Согласно рисунку 2г имеем [7]:

- площадь поверхности полусферы

$$A_{п} = 2\pi \cdot \left(\frac{d_{mp}}{2}\right)^2 = \frac{\pi d_{mp}^2}{2}; \quad (9)$$

- площадь сферической подошвы

$$A_{п} = \frac{\pi \cdot d_{mp}^2}{2} - \frac{2\pi \cdot d_{mp}}{2} \cdot \frac{h_{ом}}{2} = \frac{\pi \cdot d_{mp}^2}{2} - \frac{\pi \cdot d_{mp} \cdot h_{ом}}{2} = \frac{\pi \cdot d_{mp}}{2} \cdot (d_{mp} - h_{ом}). \quad (10)$$

Для определения расчетных (фактических) диаметров трамбовки со сферическими подошвами были проанализированы методы их определения, согласно расчетным схемам (рис. 3).

В соответствии с теорией поверхностей [8] кривизна кривой, лежащей на поверхности, равна

$$k = \left| \frac{k_N}{\cos \varphi} \right|, \quad (11)$$

где k_N – кривизна нормального сечения плоскости, которая проходит через касательную к кривой в расчетной точке.

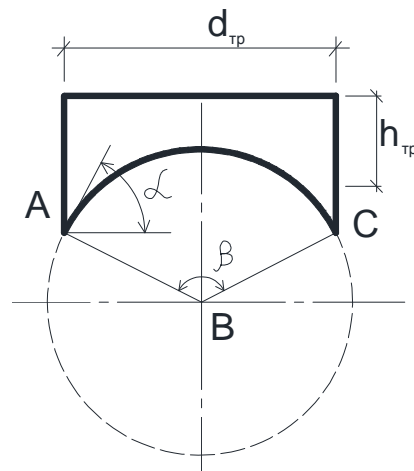
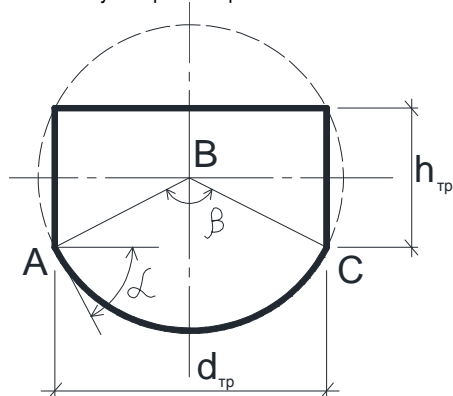


Рис. 3. Схемы для определения расчетных диаметров трамбовок

α – угол между соприкасающейся плоскостью кривой в расчетной точке и плоскостью нормального сечения, что позволяет соответственно записать

$$d_{mp}^{\phi} = \frac{d_{mp}}{\cos \varphi}. \quad (12)$$

Используя свойство сферических треугольников, при условии задания двух углов и заключенной между ними стороны, его площадь [7] может быть определена по зависимости

$$S_r = r^2 \cdot E, \quad (13)$$

где E – сферический избыток и

$$E = A + B + C - \pi \quad (14)$$

A, B и C – сферические углы

После соответствующих преобразований и упрощений получаем:

$$\Delta = r_{mp} \cdot \left(\frac{1}{2 \sin \beta} + 1 \right), \quad (15)$$

где β – сферический угол, определяющий d_{mp} .

Тогда объём зоны уплотнения может быть определен по зависимости

$$V_{сф} = \frac{\pi \cdot (d_p - d_{mp})^2 \cdot d_{mp} \cdot (d_{mp} - h_{ом}) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}{6 \cdot (1 + e_{упл})}. \quad (16)$$

Приравняв (6а) и (16), имеем после соответствующих преобразований:

$$d_p^{\text{сф}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot (d_{mp} \cdot (d_{mp} - h_{ом}) \cdot (l + h_{ом})) \cdot (1 + e_{упл})}{2 \cdot (1 + e_0) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}} + (d_{mp} + \varepsilon_{mp}). \quad (17)$$

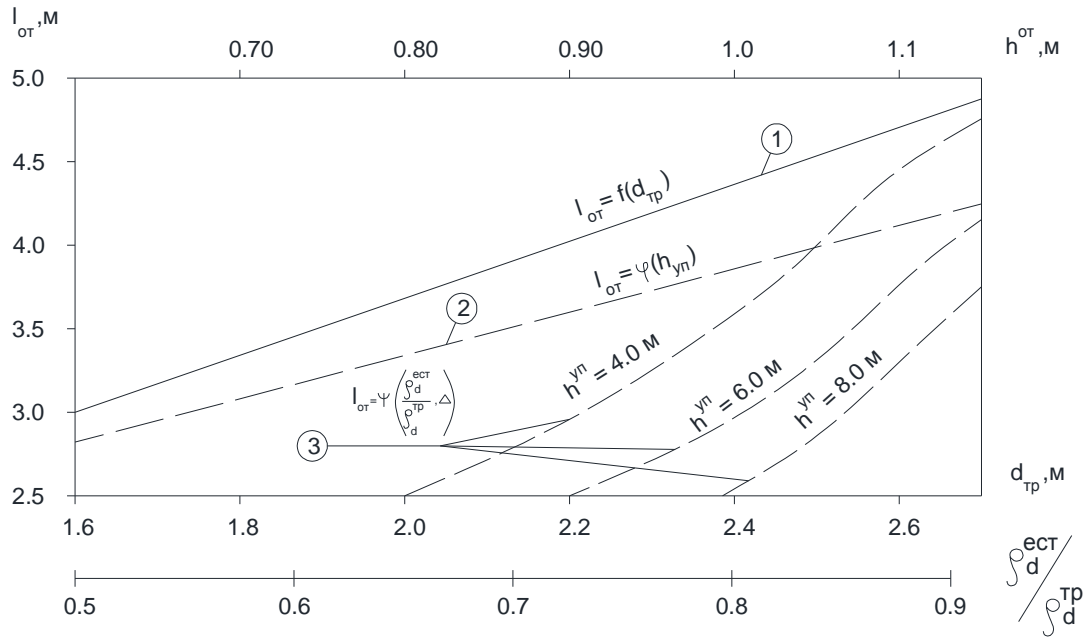
Соответственно для выпуклых полусфер (рис. 2в)

$$d_p^{\text{сф}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot (d_{mp} \cdot (d_{mp} - h_{ом}) \cdot (l + h_{ом})) \cdot (1 + e_{упл})}{2 \cdot (1 + e_0) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha}} - (d_{mp} + \varepsilon_{mp}), \quad (18)$$

где ε_{mp} – величина фактического изменения диаметра трамбовки за счет сферичности.

Что касается расчетной зависимости для схемы 1^б, т.е. при наличии в зоне уплотнения прочного подстилающего слоя грунта, то, учитывая неопределенность граничных условий, можно рекомендовать в качестве расчетной зависимости для схемы 2^г (трамбовки с выпуклой формой подошвы).

Не менее важным, наряду с определением диаметра зоны уплотнения, является выбор оптимального размещения точек уплотнения, тем более что степень однородности уплотнения грунтового основания в основном зависит от схемы расположения точек, в которых производится уплотнение грунтового основания.



$$1 - I_{om} = f(d_{mp}), \quad 2 - I_{om} = \varphi(h^{om}) \quad \text{и} \quad 3 - I_{om} = \psi\left(\frac{\rho_d^{ecm}}{\rho_d^{mp}}, h_{ym}\right)$$

Рис. 4. Графики связи

Результаты экспериментов и их обсуждение. Исследованиями (2, 4, 5) рекомендовано производить уплотнение грунтов по условной сетке различных размеров в один либо два этапа. Исследованиями показано, что более оптимальным решением является размещение точек уплотнения грунта по вершинам равностороннего треугольника. При этом, при всех относительно постоянных конструктивно-технологических параметрах ($M_{mp}, H_c, \rho_{ecm}, C, \varphi, E_0$), существует четкая линейная связь расстояний между точками трамбования (I_{OT}) и глубиной (h_{OT}) отпечатка (рис. 4).

Анализ графиков подтверждает факт возможности увеличения расстояния между точками уплотнения (I_{om}) при увеличении глубины отпечатка (h^{om}) и диаметра (d_{mp}) трамбовки.

Не менее существенна и связь (I_{om}) от отношения естественной плотности сухого грунта (ρ_d^{ecm}) и требуемой плотности (ρ_d^{mp}), при этом основными факторами являются глубина уплотняемой толщи (h^{ym}) и глубина отпечатка (h_{om}). На рисунке 4 (графики связи) $I_{om} = \psi\left(\frac{\rho_d^{ecm}}{\rho_d^{mp}}, h^{ym}\right)$ даны для $h_{om} = 1,0 \text{ м}$. Четко видно,

что увеличение мощности уплотняемой толщи в два раза (с 4,0 до 8,0 м) в 1,4 раза уменьшается расстояние между точками удара (с 3,6 до 2,6 м). Вместе с тем [3, 9, 10] отмечено, что практически не всегда можно достичь требуемой плотности (ρ_d^{mp}) при больших мощностях уплотняемого слоя, далее при глубине отпечатка 1,0–1,2 м. Технологически это требует вести трамбование с перекрытием следов, что достаточно технологически сложно, либо требуется привлечение (завоз) дополнительных объемов грунта для втрамбовывания его в основание.

Нормативными документами [5] для определения расстояния между точками уплотнения рекомендуется использовать расчетный график (рис. 5), позволяющий оптимизировать функцию $e = f(d_{mp}, H, \gamma_{ecm})$.

Для других условий (5) рекомендована следующая расчетная зависимость:

$$I = \sqrt[3]{A_2 + B_1} + \sqrt[3]{A_1 - B_1}, \quad (19)$$

где
$$A_1 = \left[-\frac{c}{2a} - \left(\frac{b}{3a}\right)^3\right]; \quad (20)$$

$$B_1 = \sqrt{\left[-\frac{1}{9} \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^2\right]^3 + \left[\left(\frac{b}{3a}\right)^2 + \frac{c}{2a}\right]^2}; \quad (21)$$

$$a = \frac{tg\varphi}{2} \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{4} \ln 3\right) \cdot (\gamma_{ecm} - \gamma_{yml}); \quad (22)$$

$$b = \frac{\sqrt{3}}{4} (h_{ym} - h_{om} + tg\varphi \cdot d_{mp}) \cdot (\gamma_{ecm} - \gamma_{yml}); \quad (23)$$

$$c = \frac{\pi d_{mp}^2}{2} \left[\left(h_{om} - \frac{tg\varphi}{12}\right) \cdot (\gamma_{ecm} - \gamma_{yml}) - \gamma_{yml} \cdot h_{om} \right], \quad (24)$$

φ – угол внутреннего трения грунта до уплотнения;

h_{om} – глубина отпечатка;

h_{ym} – глубина зоны уплотнения;

d_{mp} – диаметр трамбовки.

Отметим, что нами несколько модифицированы все приведенные расчетные зависимости. Но эти зависимости применимы только для трамбовок с плоской и круглой подошвой.

Использование трамбовок со сферическими формами подошвы требует соответствующей корректировки как расчетных зависимостей, так и расчетных графиков.

В соответствии с анализом расчетных зависимостей (17–19) корректировку I_{OT} можно осуществлять двумя путями:

- введением в расчетные значения функции (24) фактического расчетного диаметра сферической трамбовки, т.е.

$$c = \frac{\pi d_{mp}^2}{2 \cdot \cos \alpha} \left[\left(h_{om} - \frac{tg\varphi}{12}\right) \cdot (\gamma_{ecm} - \gamma_{yml}) - \gamma_{yml} \cdot h_{om} \right]; \quad (25)$$

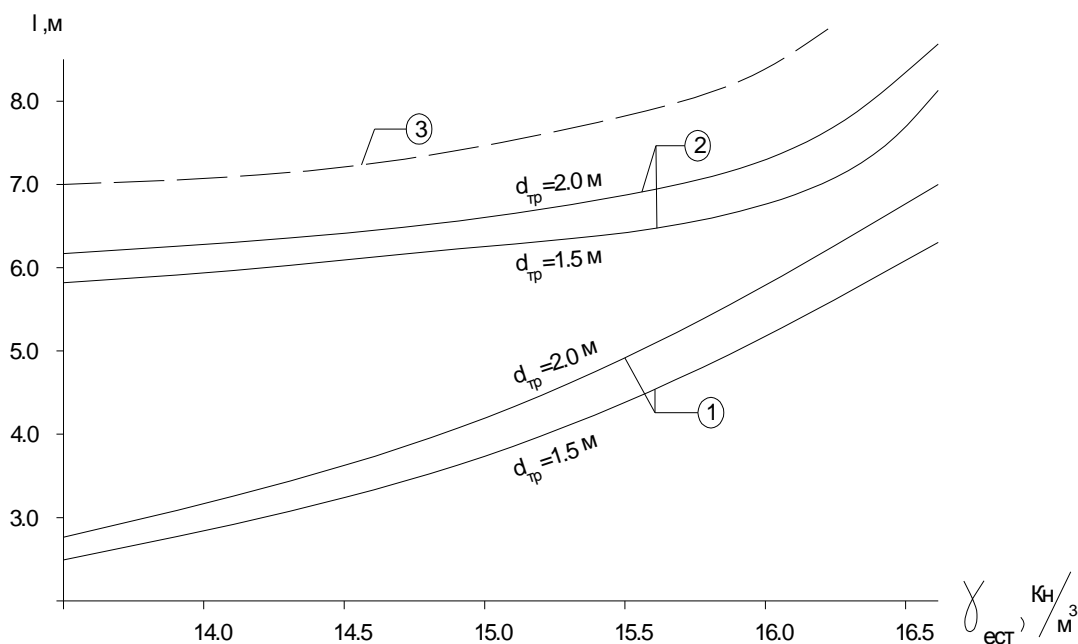


Рис. 5. График для определения расстояний между точками уплотнения трамбовками с плоской подошвой при $H = 5$ м (1) и $H = 10$ м (2); 3 – то же со сферической подошвой при $H = 10$ м

- определяя расстояние между точками трамбования по формуле, рекомендуемой нормативными документами, с последующим пересчетом на сферическую кривизну трамбовки, т.е.

$$I_p = I \left(\frac{1}{2 \cdot \sin \beta} + 1 \right) \cdot \cos \beta. \quad (26)$$

Расчеты I_p для тяжелых трамбовок $d_{тр} = 2,0$ м со сферическими подошвами для значений $\gamma_{ест}$ и $H = 5$ и 10 м (рис. 5) позволяют отметить, что расстояние между точками уплотнения может быть увеличено на 15–22%, а в некоторых случаях до 30%.

Заключение. Конструктивно-технологические параметры трамбовок и процессы уплотнения грунтовых толщ существенно влияют на эффективность работ по устройству искусственных оснований.

Разработанная конструкция тяжелых трамбовок со сферической формой подошвы позволяет увеличить расстояние между точками уплотнения на 15–22%, а в некоторых случаях и до 30%.

Предложенные расчетные зависимости позволяют оптимизировать параметры как трамбовок и технологических процессов, так и деформационно-прочностных характеристик грунтов проектируемых искусственных оснований.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 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.
- 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.
- Пойта, П.С. Оптимизация технологических параметров уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками / П.С. Пойта // Вестник БрГТУ. – 2003 – № 1: Строительство и архитектура. – С.109–110.
- Пойта, П.С. Влияние физико-механических свойств уплотняемого грунта на оптимальный диаметр трамбовки / П.С. Пойта // Строительство. – Минск, 2003. – №1–2. – С. 243–247.
- Грунтовые основания уплотненные тяжелыми трамбовками: ТКП 45-5.01-107-2008. – Минск: Минархстрой РБ, 2008. – 29 с.
- 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.
- Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн. – М.: Наука, 1973. – 831 с.
- Савелов, А.А. Плоские кривые. Систематика, свойства, применение / А.А. Савелов – М. –Л.: Физматгиз, 1960. – 394 с.
- Пойта, П.С. Особенности формирования зоны уплотнения грунта при уплотнении грунтового основания тяжелыми трамбовками // П.С. Пойта, П.В. Шведовский, Д.Н. Клебанюк // Матер. XVIII Межд. научн.-метод. семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовка инженерных кадров в Республике Беларусь». – Новополоцк: ПГУ, 2012. – С. 186–189.
- Клебанюк, Д.Н. Особенности процесса распределения давлений и напряжений при уплотнении неоднородных грунтовых оснований тяжелыми трамбовками / Д.Н. Клебанюк, А.Ю. Дроневиц, П.В. Шведовский, П.С. Пойта // Матер. XVIII Межд. научн.-метод.семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовка инженерных кадров в Республике Беларусь». – Новополоцк: ПГУ, 2012. – С. 239–244.

Материал поступил в редакцию 04.01.13

KLEBANIUK D.N., POYTA P.S., SHVEDOVSKY P.V. Features of a technique of a choice of technological parameters at consolidation of the soil bases by heavy tampers.

In article the main regularities of dynamic consolidation of soil massifs are analysed by heavy tampers. The tamper design with a spherical form of a sole is developed.