

УДК 624.138:624.131.21

УПЛОТНЕНИЕ НАСЫПНЫХ ГРУНТОВ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Сеськов В.Е.

РУП «Институт БелНИИС», г. Минск, Республика Беларусь

В статье рассмотрены особенности уплотнения песчаных и глинистых грунтов в сложных грунтовых условиях, в том числе переувлажненных грунтов, грунтов ниже уровня грунтовых вод, и приводятся технологические параметры уплотненных грунтов (степень уплотнения, глубина уплотнения при различных вибронагрузках). Отражены вопросы влияния различных технологических параметров (частота, амплитуда колебаний, статический вес, число проходов катка и т.д.) на эффективность уплотнения.

The article presents sandy and clayey grounds compaction habits in close soil conditions including over-wetted soils, below-groundwater soils. Process parameters of compacted grounds (degree of compaction, compaction depth at various vibroloading) are given. The issues concerning the influence of various process parameters (vibration frequency and amplitude, compactor static weight and its passes number) on compaction performance are considered.

Введение

Строительство на насыпных грунтах является одной из наиболее важных и сложных проблем, обусловленных широким распространением этих грунтов. Одним из основных технологических процес-

сов строительства на насыпных грунтах является их уплотнение. От того, как запроектированы и реализованы работы по уплотнению, зависит, надежность, качество и долговечность сооружения. В тоже время, стоимость уплотнения составляет лишь сравнительно малую часть общих строительных расходов (около 5 %). Правильно выполненное уплотнение позволяет существенно повысить несущую способность и устойчивость насыпного основания.

Для возведения оснований под здания и сооружения используют самые различные материалы – от глин, до щебня, гравия. Это могут быть также грунты, укрепленные цементом, известью или органическими вяжущими, шлак, зола уноса, а также промышленные и строительные отходы (кирпич, железобетонные обломки и т.д.).

Значительные различия в свойствах уплотненных материалов, разнообразных погодно-климатических факторов и условий на строительных площадках – все это практически исключает возможность установления каких-либо единых и простых правил уплотнения. Поэтому в насыпных основаниях отсыпанных не планомерно (отвалы, промышленные отходы и т.д.) обязательно устраивать опытные участки по уплотнению с контролем их характеристик (зондирование, штамповые испытания).

В республике разработаны нормативные документы по уплотнению [1–3], но в сложных условиях возникают определенные трудности, которые требуют технологических решений.

В настоящей статье рассматриваются вопросы уплотнения планомерно возводимых насыпей (оснований) из песчаных и глинистых грунтов, где известны или могут быть спланированы гранулометрический состав грунтов, влажность, максимальная плотность при оптимальной влажности, показатель текучести.

Экспериментально-теоретические исследования

Экспериментальные исследования производились на опытных площадках из насыпных песчаных и глинистых грунтов. Насыпи из песчаных грунтов (мелкие, средней крупности и крупные) были отсыпаны мощностью до 4,0 м без уплотнения (планировка бульдозером). Насыпи из глинистых грунтов (супесь моренная) толщиной до 2,0 м (без уплотнения).

Гранулометрический состав (средняя массовая проба) песчаных насыпей в среднем получилась как песок средний с $P_m = 26$ мм.

Π_M – максимальная неоднородность песчаного грунта:

$$\Pi_M = \frac{d_{50} \cdot d_{95}}{d_5},$$

d_5, d_{50}, d_{95} – диаметры частиц, мм, меньше которых в данном грунте содержится по массе соответственно 5, 50, 95 % частиц.

Π_M определяется по графику гранулометрического состава.

По результатам стандартного уплотнения (ГОСТ 22733) определялась максимальная плотность сухого грунта $\rho_d^{\max} = 1,80 \text{ г/см}^3$ и относительная оптимальная влажность $W_{\text{опт}} = 9,5\%$ (рис. 1).

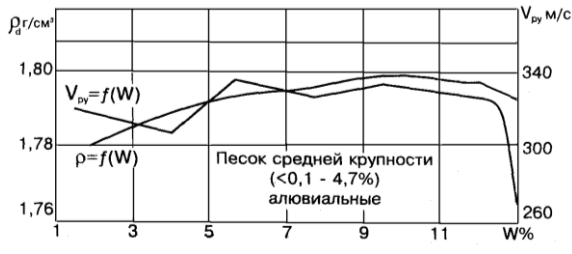


Рис. 1. Зависимость плотности песка (средний) от его влажности и скорости упругих волн от плотности

Для глинистых грунтов – супесь моренная максимальная плотность сухого грунта и оптимальная влажность, соответственно равны: $\rho_d^{\max} = 2,188 \text{ г/см}^3$, $W_{\text{опт}} = 7,4 \%$ (рис. 2).

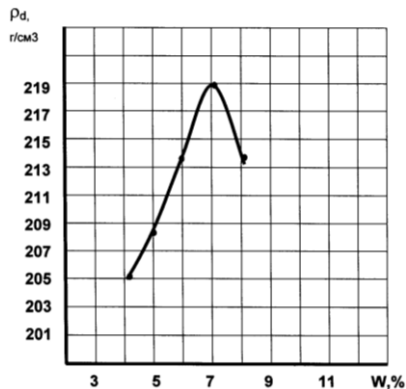


Рис. 2. Зависимость плотности сухого грунта от его влажности (супесь моренная)

Естественная влажность песчаных грунтов в насыпи в среднем $W_{cp} = 7,8\%$, а в глинистых для супеси моренной $W_{cp} = 10,1\%$.

На опытных площадках (из песчаных и глинистых грунтов) были выделены полосы участков (шириной до 4, 0 м и длиной 20,0 м), на которых производилось уплотнение виброкатками с разной массой вальца (6, 8, 12, 16 тс).

Количество проходов по одному следу производили до тех пор, пока приращение плотности сухого грунта (ρ_d) по глубине не было более $0,01 \text{ г/см}^3$.

Обычно этот показатель достигается при 12–15 проходов по одному следу. Целью этих экспериментальных исследований – установить максимальную глубину уплотнения (т.е. приращения плотности по глубине более $0,01 \text{ г/см}^3$) в зависимости от веса виброкатка, частоты и амплитуды колебаний.

На рис. 3 представлены результаты контроля уплотнения песчаных грунтов по глубине динамическим зондированием с контрольными испытаниями плотности сухого грунта (ρ_d) путем отбора грунта кольцом (через 0,5 м по глубине).

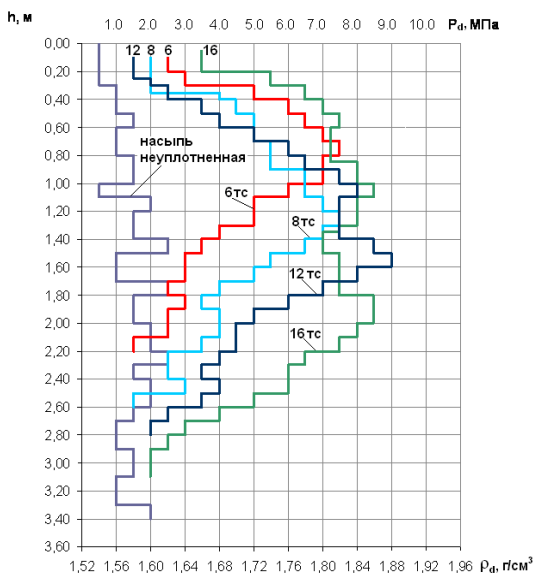


Рис. 3. Глубина уплотнения песчаных грунтов (средние) при уплотнении виброкатками с разным весом вальца (цифры – вес виброкатка)

Анализ полученных результатов показывает, что при проходе по одному следу 15 раз 6 тонного виброкатка («Амкодор» и др.) уплотнение ρ_d до $K_{com} \geq 0,95$ достигается до глубины 1,1 м ($\rho_d \cong 1,76 \text{ г/см}^3$, $\rho_d - 6,0 \text{ МПа}$), а увеличение плотности наблюдается до глубины 1,7 м ($K_{com} = 0,88$). Начальный коэффициент уплотнения (доуплотнения) $K_{com} \cong 0,85-0,87$.

При проходе по одному следу 15 раз 8 тонного виброкатка, уплотнение до $K_{com} \geq 0,95$ достигается до глубины 1,5 м ($\rho_d \cong 1,76 \text{ г/см}^3$), а увеличение плотности, по сравнению с первоначальной (до уплотнения) $K_{com} \cong 0,85-0,87$ до глубины 2,1 м. Для виброкатка в 12 тс, соответственно 1,9 м ($K_{com} = 0,95$) и 2,7 м ($K_{com} \cong 0,88$), 16 тонный виброкаток дал следующие результаты при $K_{com} = 0,95$, глубина уплотнения 2,5 м, а уплотнение $K_{com} = 0,88$ на глубине 2,9 м. Максимальная плотность $K_{com} = 0,99-1,0$ и более ($\rho_d \cong 7,5-8,0 \text{ МПа}$) в интервале 0,3–2,1 м для виброкатков 6–16 тс (см. рис.3).

Глубина уплотнения в песчаных грунтах в основном зависит от гранулометрического состава (т.е. от максимальной неоднородности Π_m , содержания пылевато-глинистых частиц, влажности и может колебаться по глубине $\pm 0,3-0,4$ м, чем больше Π_m , тем обычно глубже идет уплотнение. Содержание пылевато-глинистых частиц наиболее оптимально для уплотнения в пределах 2–6 %. При полном водонасыщении обычно глубина уплотнения даже увеличивается на 0,5 м (уплотнение через буферный слой толщиной 0,3–0,5 м), если пылевато-глинистых частиц $< 0,1$ мм не превышает 6 %.

Участок глинистых грунтов (супесь моренная) толщиной до 2,0 м уплотняли виброкатками (8 и 12 тс, прицепными, производства ГДР). Характеристики уплотняемого грунта приводятся выше, а на рис.2 график определения максимальной плотности при оптимальной влажности (прибор «СоюздорНИИ»).

Как видно из рис. 4, при уплотнении насыпи (влажность близка к относительной $W = 10\%$) уплотнение виброкатком 8 тс до коэффициента $K_{com} = 0,95$ достигает глубины 0,7–0,8 м. Начальная, т.е. до уплотнения плотность грунта в пределах $\rho_d = 1,90 \text{ г/см}^3$. На глубине 1,1 м увеличение плотности практически не наблюдается. При уплотнении 12 тс катка, коэффициент уплотнения $K_{com} = 0,95$

наблюдается до глубины 1,1–1,2 м и на глубине 1,4–1,5 фактически уплотнение отсутствует.

При влажности в 1,2 раза более W_p (W_p – раскатывание) глинистые грунты уплотнить достаточно сложно без предварительного улучшения их характеристик, т.е. уменьшения влажности, цементации и т.д.).

В процессе экспериментальных исследований изучались влияния на уплотнение параметров: влажности, грансостава, частоты колебаний вибратора, скорости движения виброролка, влияния горизонтального и вертикального армирования щебнем.

Рассмотрим особенности уплотнения различных видов грунтов как в лаборатории, так и натуральных условиях. Вибрационный метод является удобным и рентабельным для уплотнения песка и песчано-гравийных смесей.

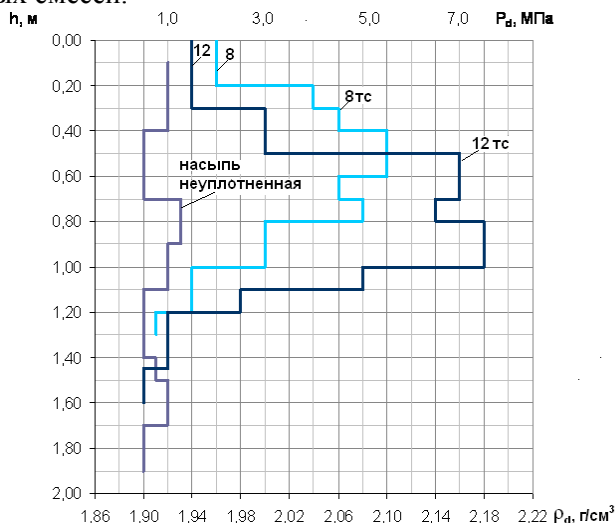


Рис. 4. Глубина уплотнения супеси моренной при уплотнении виброролками разного веса (цифры – вес катка)

Автором приведен комплекс исследований по уплотняемости различных грунтов Беларуси (на основе ГОСТ 22733). Изучалась зависимость от грансостава, максимальной неоднородности (Π_M), влажности, водонасыщенности, содержания в грунтах пылевато-глинистых частиц.

На рис. 5 показаны типичные осредненные графики, построенные по результатам испытаний по ГОСТ 22733 для различных ви-

дов и генезиса грунтов, из которых видна зависимость максимальной плотности от влажности и грансостава. Чем больше содержание пылевато-глинистых частиц, тем выше влажность при максимальной плотности, уже «коридор» влажности при максимальной плотности. В песчаных грунтах менее выражены «пики» максимальной плотности, т.е. более растянуты и могут быть несколько максимальных значений близких по величине.

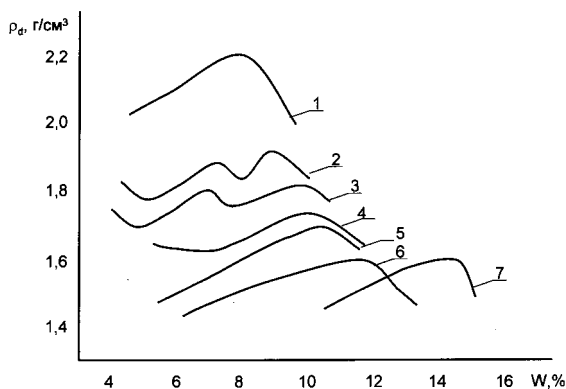


Рис. 5. Обобщенные кривые, построенные по результатам лабораторных испытаний (ГОСТ 22733):
 1 – супеси и суглинки (морена); 2 – песок крупный и средний; 3 – песок мелкий;
 4 – песок пылеватый; 5 – супесь и суглинок лессовидный;
 6 – суглинки (озерно-ледниковые); 7 – глины (озерно-ледниковые)

В песчаных грунтах возможность уплотнения слоев большой толщины (см. рис. 3). Следует отметить, что песок и гравий с естественным водоотводом достигают более высоких значений плотности и уплотняются слоями большей толщины будучи в водонасыщенном состоянии (при содержании частиц < 0,1 мм менее 10 % и $K_{\phi} \geq 3,0$ м/сут), чем при пониженной естественной влажности. При наличии естественного водоотвода работы в период дождей не следует приостанавливать, так и в случае отсутствия естественного водоотвода (высокий коэффициент фильтрации $K_{\phi} \geq 3,0$ м/сут). Очень влажные основания (насыпи) с естественным водоотводом под действием вибрационной машины одновременно обезвоживаются и уплотняются. Такие хорошие результаты получаются и при уплотне-

нии мелких песков под водой ($K_{\phi} \geq 3,0$ м/сут). Если песок или гравий содержит определенное количество мелких фракций (обычно более 10 % фракций менее 0,1 мм и $K_{\phi} < 1,0$ м/сут), то при очень высокой влажности он уже не имеет естественного водоотвода и становится упругим (идет «волна»). Такие насыпи невозможно уплотнить до столь же высокой плотности, поэтому требуются мероприятия для достижения оптимальной влажности грунта или близких значений влажности.

На насыпях из одномерного песка ($\Pi_m = 1-4$) трудно бывает получить высокую плотность грунта, расположенного близко к поверхности, т.е. на глубине до 20 см. Причина здесь кроется в низком сопротивлении однородных грунтов (песка) сдвигу, в результате песок выжимается вверх и поверхностный слой приобретает низкую плотность.

На практике это явление не имеет большого значения, так как обычно насыпь сооружается в несколько слоев, предыдущий слой уплотняется при виброукатке, поэтому под фундаментами при уплотнении таких грунтов рекомендуется устраивать слой песчано-гравийной смеси (или гравия) толщиной 20–30 см.

Другая особенность, связанная с уплотнением очень мелких (количество фракций менее 0,1 мм более 10 %) и пылеватых песков, состоит в том, что при высокой их влажности в результате воздействия динамических нагрузок грунт быстро разжижается. Последнее обусловлено поровым давлением, возникающим в результате динамической нагрузки, при этом коэффициент фильтрации K_{ϕ} обычно менее 1 м/сут.

Эффективность уплотнения пылеватых песков в большей степени зависит от их влажности, которая не должна существенно отклоняться от оптимальной (около $\pm 3^\circ$). При оптимальной влажности эти грунты могут уплотняться даже слоями толщиной 0,7–1,0 м (по причине небольшого сцепления обычно 0,003–0,006 МПа), но при использовании тяжелых вибрационных катков с массой вальцового модуля 8–15 тс.

При уплотнении моренных грунтов (супеси, суглинки) большую роль играет влажность. При оптимальной влажности указанные грунты достаточно хорошо уплотняются слоями толщиной 0,7–0,8 м с использованием виброкатков 8–15 тс, при увеличении влажности на 2–3 % уплотняемость резко падает при уплотнении виброкатками. В этом случае более целесообразно их уплотнять трамбовками весом 5–10 тс через буферный песчаный слой (толщиной 0,5–

1,0 м). В этом случае грунт уплотняется до глубины 3–4 м (коэффициент уплотнения $K_y = 0,95$).

При уплотнении лессовидных супесей, суглинков, глин озерно-ледникового генезиса обладающих большей пластичностью, зависимость уплотнения от влажности является определяющим моментом. Даже изменение на 2–3 % делает грунт очень пластичным (идет «волна»), а менее – грунт становится «комковатым». Толщина уплотнения с оптимальной влажностью до 0,5 м, а при большей влажности можно уплотнить только статической нагрузкой слоями до 0,3 м.

Влияние частоты и амплитуды колебаний на эффективность уплотнения грунтов имеет сложный характер. Так увеличение амплитуды приводит, обычно, к увеличению эффективности уплотнения и глубины уплотнения по всему диапазону частот. Эта закономерность справедлива для всех видов грунтов. При достижении определенной плотности грунта повышение частоты может вызвать так называемое «козление», т.е. отрыв вальца от грунта, что может вызвать уменьшение эффективности уплотнения из-за неоднородности уплотнения и повышения количества колебаний, т.е. по причине отрыва вальца от поверхности грунта. Из практических опытных работ можно отметить, что для грунтов оптимальная частота колебаний в пределах 25–30 Гц с амплитудой 1,5–2,0 мм. Для большинства грунтов с толщиной уплотнения более 1,0 м повышение частоты f больше 50 Гц значительно уменьшает эффективность уплотнения (разрыв контакта).

В работе [4] приводится приблизительная зависимость эффективности усилия уплотнения с изменением частоты и постоянной амплитуде возмущающей силе:

$$Q = f_1 \cdot (q) + f_2 \left(\frac{a \cdot f}{v} \right),$$

где Q – усилие уплотнения; f_1 и f_2 – функции; q – статическая линейная нагрузка; a – амплитуда; f – частота; v – скорость движения катка.

Приведенная зависимость указывает и на зависимость эффективности уплотнения от скорости движения катка. Чем выше скорость, тем больше необходимо проходов. По практическим испытаниям многие авторы указывают оптимальную скорость, которая для большинства грунтов (особенно песчаных), находится в пределах 3–6 км/ч (гравий), меньшая скорость (3–4 км/ч) обычно более эффективна для глинистых грунтов и слоев песчаных грунтов большей толщины (1–2 м).

Второстепенное значение на эффективность уплотнения могут иметь и другие параметры, например, соотношение массы рамы и вальца, диаметр и количество вальцов, центробежная сила и т.д.

Выводы

1. Глубина уплотнения зависит от веса вальца и может колебаться для песчаных грунтов (мелкие, средние, крупные, ПГС) при весе виброкатка от 6 до 12 тс от 1,5 м до 2,7 м, для $K_{\text{com}} = 0,95$ от 1,1 м до 2,0 м, глинистых от 0,5 м до 0,9 м ($K_{\text{com}} = 0,95$).

2. Амплитуда и частота колебаний на эффективность уплотнения носит сложный характер, но на практике рекомендуется амплитуда колебаний 1,5–2,0 мм, частота колебаний 25–30 Гц. Скорость движения наиболее оптимальна при 1–4 км/час.

3. Песчаные грунты с коэффициентом фильтрации $K_{\text{ф}} \geq 3$ м/сут под уровнем грунтовых вод достаточно хорошо уплотняются и даже эффективнее, чем влажные.

4. Эффективность уплотнения глинистых грунтов и песчаных при коэффициенте фильтрации < 1 м/сут во многом зависит от оптимальной влажности и даже отклонено на 2–3 % резко уменьшают эффективность уплотнения.

5. Эффективность уплотнения повышается при чередовании слоев из песка и гравия (армирование слоями).

6. Эффективность уплотнения верхнего слоя песка (однородного) резко повышается, если он уплотняется через буферный слой гравия (щебня) толщиной 0,2–0,3 м.

Литература

1. Земляные сооружения. Контроль степени уплотнения грунтов : СТБ 2176-2011. – Минск : Госстандарт,

2. Проектирование и устройство оснований из насыпных, малопрочных и слабых грунтов, уплотненных вибродинамическим методом : П5-2000 к СНБ 5.01.01-99. – МАиС Респ. Беларусь, 2001.

3. Сеськов, В.Е. Технология уплотнения грунтов оснований зданий и сооружений вибродинамическими методами / В.Е. Сеськов, В.Н. Лях. – Минск : БелНИИС, 1997. – 62 с.

4. Форссблад, Л. Вибрационное уплотнение грунтов и оснований / Л. Форссблад. – М. : Транспорт, 1987. – 192 с.