

Министерство образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский технический университет

В.И. Телешев, Н.Б. Колосова

# **Технология общестроительных работ**

(конспект лекций)

Раздел 3. Технология уплотнения грунтов.  
Качественные насыпи.

Санкт-Петербург  
2003 г.

## Введение

Технология строительства является научной дисциплиной о способах и средствах выполнения строительно-монтажных работ в период строительства различных сооружений.

Она отвечает на вопрос: "Как и чем осуществлять данные строительно-монтажные работы?". Эффективность строительства во многом зависит от уровня технологии работ, от умения инженеров строителей использовать и внедрять наиболее эффективные технологические схемы и механизацию.

Инженеры-строители предназначены в основном для работы в строительных, проектных научных и эксплуатационных организациях имеющих отношение к строительству.

Для инженеров-строителей, работающих непосредственно на строительстве или ремонте сооружений, дисциплина "Технология" является основной профилирующей дисциплиной и здесь важность этой дисциплины наиболее очевидна.

Но и работа в проектных и научных организациях на конструкторской, расчётной или исследовательской работе требует от инженера-строителя ясного представления о способах, технических и производственных возможностях выполнения той или иной проектируемой и исследуемой конструкции и их учёта при проектировании.

При изучении технологии отдельных видов работ основное внимание необходимо уделить не просто вопросу как и чем выполнять данную работу, а физической сущности процесса, факторам, влияющим на эффективность его применения и рабочему обоснованию параметров этого процесса с возможной их оптимизацией.

При изучении "технологии" необходимы знания и умения, приобретённые студентами в процессе освоения курсов строительных материалов, механики грунтов, конструкций сооружений, техники безопасности. Курс тесно связан с дисциплинами "организация и планирование строительства" и "экономики строительства". Эти курсы взаимно дополняют друг друга.

Трудности изучения дисциплины "технология" связаны с тем, что это - первая дисциплина, связанная непосредственно с производством. Многие студенты ни разу не были на стройках, не видели многих строительных машин и технологических процессов. Для облегчения усвоения учебного материала предполагается использовать технические средства обучения, компьютерную технологию обучения с демонстрацией аудио видео материалов.

Большая роль отводится лабораторным, курсовым работам и проектам и производственным практикам.

Таким образом, целью обучения студентов по данному курсу является:

- Знание методов выполнения различных видов работ, средств механизации, технологических схем, физической сущности процессов, основных параметров процессов, факторов влияющих на эффективность процессов, областях их применения.
- Умение выбрать и обосновать методы производства работ, подобрать машины для их выполнения, составлять технологические карты, сравнивать варианты технологии и механизации и на этой основе выбирать наиболее эффективные, оценивать технологичность конструкции, пользоваться справочной литературой.
- Получение производственного опыта творческой работы по выполнению п.2 на основе выполнения упражнений, курсовых работ, прохождения производственной практики.

Дисциплина «Технология общестроительных работ» изучается на всех специальностях строительного профиля ИСФ.

Настоящая работа представляет собой краткий конспект лекций по этой дисциплине, читаемых авторами на ИСФ и предназначена для студентов ИСФ в помощь при выполнении курсовых работ и проектов и при подготовке и сдаче экзаменов.

Весь курс лекций разбит на отдельные части и разделы, в соответствии с учебным планом и программами, и их публикация в электронном виде, предполагается отдельно по мере их готовности. Графический материал готовится специально для лекций в упрощенном виде удобном для воспроизведения их студентами.

Данный выпуск посвящен 1 разделу «Технология разработки мягких грунтов».

В подготовке раздела к электронному изданию активное участие принимали студенты 4 курса ИСФ Богач Д.Б., Цидулко Д.И., Кемниц А.П., Полукарова. Е.М., Павлова А.В.. Авторы выражают им глубокую благодарность.

## Тема 8.

### Сущность уплотнения и влияние различных факторов на уплотнение

#### 8.1 Сооружения из качественных насыпей

К качественным насыпям относятся насыпи, удовлетворяющие определенным требованиям к этим насыпям, например по составу и характеристике грунтов, плотности, водонепроницаемости, устойчивости и т.д. Отсюда и различные требования к технологии их возведения. Это – земляные плотины, дамбы, перемычки, обратные засыпки, земляное полотно автодорог, железных дорог и т.д. (рис.8.1). Наиболее характерными для нас – гидротехников являются плотины.

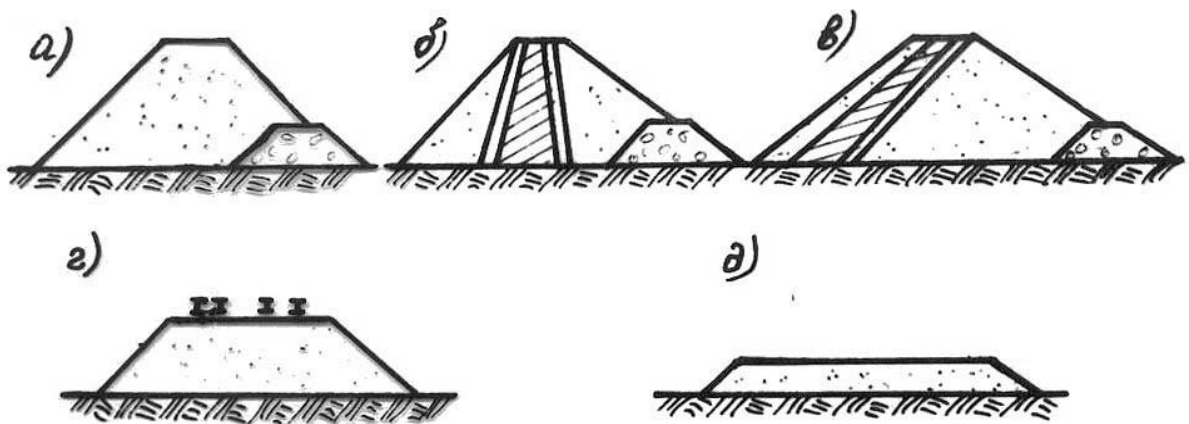


Рис.8.1. Основные типы сооружений из качественных насыпей.

*а, б, в – плотины соответственно однородные, неоднородные с ядром, неоднородные с экраном,  
г – насыпь под железную дорогу,  
д – насыпь под автомобильную дорогу.*

Технология возведения качественных насыпей должна быть такой, чтобы были удовлетворены все требования, предъявляемые к качеству сооружения.

Для выявления свойств материалов, используемых в насыпи, вначале производятся соответствующие изыскания местных строительных материалов.

Далее составляются различные варианты плотины как по конструкции, так и по технологии возведения. На основании технико-экономического сравнения выбирается оптимальный и для него составляется окончательный проект и разрабатывается окончательная технология.

Для качественных насыпей используется обычно качественный грунт из полезных выемок или карьеров.

В принципе, для земляной плотины пригодны почти все виды мягких грунтов, за исключением плавунных, илистых и трудно разрабатываемых глин.

## 8.2 Состав технологических процессов

Отсыпка грунта в насыпи всегда производится отдельными слоями. Слои могут быть как горизонтальными, так и наклонными.

Послойная отсыпка включает несколько технологических процессов (рис.8.2).

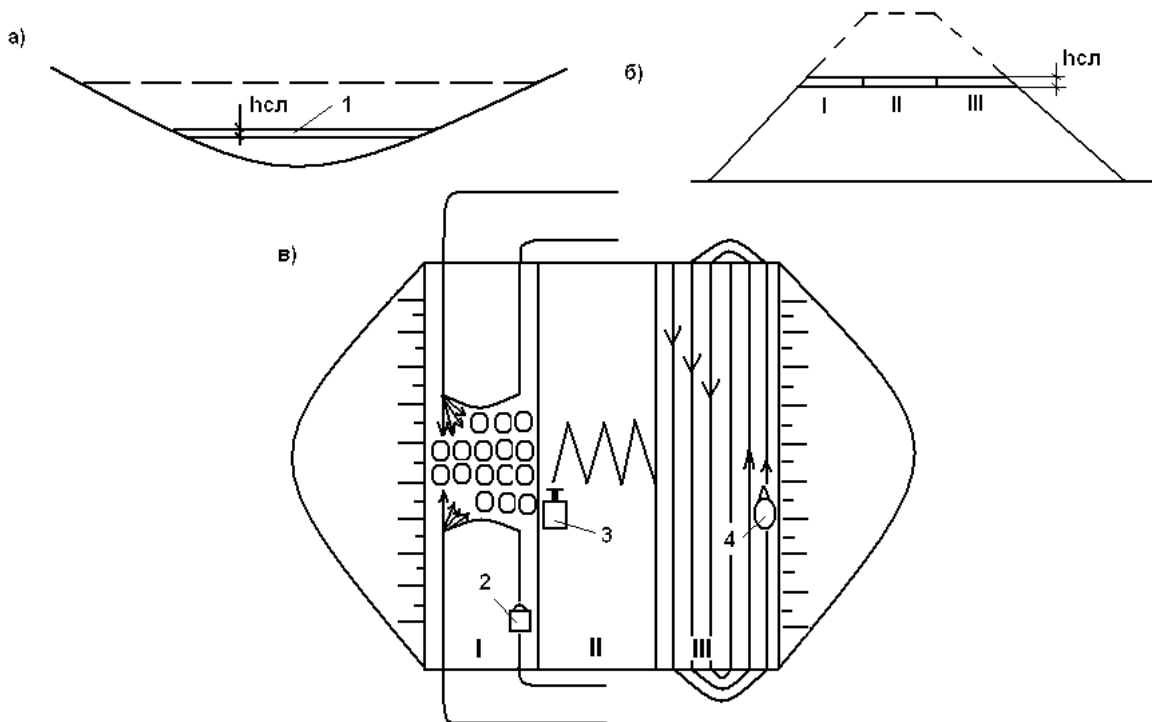


Рис. 8.2. Схема отсыпки однородной плотины (насыпи)

*а – разрез по оси насыпи,*

*б – поперечное сечение насыпи,*

*в – план на отметке насыпи (разбивка на карты отсыпки).*

*I,II,III – карты отсыпки соответственно.*

*Отсыпка и увлажнение, послойное разравнивание, уплотнение:*

*I – слой отсыпки,*

*2 – землевоз,*

*3 – бульдозер,*

*4 – уплотняющая машина.*

I 1. Подготовка поверхности.

2. Отсыпка.

II 3. Разравнивание.

4. Дополнительная обработка грунта до требуемых технологических свойств (увлажнение, подсушка и др.).

### III 5. Уплотнение.

#### 6. Контроль качества.

Устройство насыпи начинается с подготовки основания. Это – удаление деревьев, кустарников, растительного слоя. Растительный слой удаляется бульдозерами, скреперами. Для лучшего контакта основание рыхлится. Если насыпь возводится не сразу, то оставляется защитный слой, который удаляется непосредственно перед отсыпкой. Толщина слоя: 20 – 30 см – до зимы, до 1 – 1,5 м – если на зиму, в глинистом грунте.

После подготовки основания составляется акт на «скрытые работы». Основание принимается комиссией.

Подготовка поверхности в процессе отсыпки заключается в рыхлении верхнего укатанного слоя.

Отсыпка грунта производится, как правило, самосвалами, скреперами или другими транспортными средствами (конвейеры).

Разравнивание производится обычно бульдозерами слоями требуемой величины.

Дополнительная обработка - доведение грунта до требуемой кондиции. Это наиболее сложная технологическая операция, методы выполнения ее будут предложены ниже.

Для обеспечения непрерывности процесса поверхность насыпи разбивается на отдельные участки – карты, на которых последовательно производятся все технологические операции.

### 8.3 Сущность уплотнения

Для возведения любой насыпи, прежде всего, необходимо где-то разработать и транспортировать грунт для этой насыпи. Грунт в естественном состоянии может быть очень плотный, но в процессе разработки и перемещения он подвергался различным воздействиям, в результате чего его прежняя структура и плотность изменились.

Поэтому при укладке в насыпь необходимо снова привести его в такое состояние, которое повысило бы его плотность и устойчивость против внешних воздействий.

Это достигается процессом уплотнения.

Именно тщательное уплотнение обеспечивает устойчивость таких земляных сооружений как плотины, дамбы. От степени уплотнения зависит долговечность насыпей и долговечность возводимых на них дорогостоящих сооружений (зданий, дорог и т.д.).

Вместе с тем, уплотнение является и наиболее дешевым и поэтому самым распространенным методом придания грунтам необходимой прочности и устойчивости.

Его стоимость обычно составляет не более 5–6 % от общей стоимости земляных работ.

В чем же сущность уплотнения?

Формулировки сущности уплотнения к сожалению отсутствуют даже в наших учебниках. Отсюда и возникает непонимание влияния различных факторов.

Вот что сказано в учебнике “Производство гидротехнических работ”(параграф №55 «Уплотнение грунта», стр 195»: “В процессе уплотнения под действием статической или динамической нагрузки происходит сближение частиц грунта в следствие вытеснения воды и воздуха, причем мелкие частицы перемещаются в поры между крупными”.

А что за сближение частиц? Это что: смятие, деформация или износ? За счет чего уплотнение? Т.е. сущность здесь не раскрыта. В учебнике “Технология строительных процессов” вообще нет раздела “уплотнение грунтов” (ТСП М. Высшая школа 1997).

В предыдущих изданиях “Технологии строительного производства” 1996г., Смирнов Н.А. сказано: “Уплотнение грунта производится с целью увеличения несущей способности грунта, уменьшения его сжимаемости и снижения водопроницаемости”.

Это – цель, а где сущность технологии?

Действительно, цель уплотнения – получение плотной и прочной структуры грунта, устойчивой к будущим нагрузкам и к воздействиям природных климатических факторов. А как этого достичь, в чем сущность технологии уплотнения? Об этом здесь ничего не сказано. Отсюда недопонимание процесса уплотнения.

Сущность должна включать основной процесс, происходящий в грунте. Это не смятие и деформация частиц, а перемещение частиц и занятие ими более компактного, устойчивого положения с точки зрения неизменности структуры. Поэтому правильнее сущность уплотнения формулировать так:

Сущность уплотнения заключается в обеспечении перемещения отдельных частиц внутри грунта и такого их перераспределения в положении, которое образует более компактную, устойчивую структуру против внешних воздействий.

Под структурой понимается взаиморасположение отдельных частиц, характер связей между ними, количество и качественное состояние в грунте влажности. Перемещение частиц может быть обеспечено различными воздействиями: силовыми, динамическими, вибрационными и др. И, в зависимости от свойств грунта, эти воздействия имеют разный эффект. Наша задача – выбрать такие воздействия, которые в наибольшей мере способствуют перемещению частиц именно данного грунта данных свойств.

#### **8.4 Требуемые плотности**

Требования к уплотнению многогранны. В общем итоге – получение прочной и плотной структуры. Понимая под структурой взаиморасположение отдельных частиц, характер связей между ними и количественное и качественное состояние в грунте влаги.

К сожалению, комплексный метод оценки получаемой структуры еще не разработан. Поэтому требования к уплотнению выражаются в основном значениями плотности сухого грунта.

В принципе различают три категории плотности:

$$\rho_{ep} = \frac{m_{ep}}{V_{ep}} - \text{плотность грунта (вместе с водой)}, \quad (8.1)$$

$$\rho_{скел} = \frac{m_T}{V_{ep}} - \text{плотность сухого грунта или скелета}, \quad (8.2)$$

$$\rho_S = \frac{m_T}{V_T} - \text{плотность твердых частиц грунта}, \quad (8.3)$$

$= \varphi$  (минералогическое состояние)  $\approx 2,4 \div 2,8$ .

При этом влажность:

$$W = \frac{m_e}{m_T} = \frac{m_e - m_T}{m_T} = 0,01-0,6 \text{ (1-60 \%)} \quad (8.4)$$

Производными этих характеристик являются:

а) Пористость:

$$n = \frac{V_{II}}{V_{ep}}, \quad (8.5)$$

аналогично для твердых частиц:  $m = \frac{V_T}{V_{ep}}$ ,

$$m + n = 1.$$

б) Коэффициент пористости:

$$e = \frac{V_{II}}{V_T} = \frac{n}{m}. \quad (8.6)$$

в) Степень водонасыщения или степень влагонасыщенности:

$$S_r = \frac{V_e}{V_{II}}, \quad (8.7)$$

$$S_r = \varphi \text{ (заполнение пор водой)} = 0-1.$$

Песчаные грунты условно разделяют на;

маловлажные  $S_r \leq 0,5$ ;

влажные  $0,5 < S_r < 0,8$ ;

насыщенные  $S_r > 0,8$ .

$$\text{Требуемую плотность определяют как: } \rho_{ск} = \kappa \rho_{ск. \max} \quad (8.8)$$

$\rho_{ск. \max}$  -  $\frac{g}{cm^3}$  - максимальная, стандартная плотность, определяемая на приборе стандартного уплотнения (за границей – прибор Проктора).

$\kappa_y$  - коэффициент уплотнения (норма плотности), устанавливаемая нормативами для различных сооружений.

Для ответственных земляных сооружений  $\kappa_y \approx 0,95-1,0$ .

Для оценки плотности сложения несвязных грунтов значений  $\rho_{скел}$ ,  $n$ ,  $e$  недостаточно, т.к. плотность сложения еще зависит и от формы частиц,



даже одинаковые по зерновому составу грунты могут в одном и том же состоянии по плотности сложения иметь различные  $\rho_{скел}$ ,  $n$ ,  $e$ .

Поэтому для таких грунтов вводится дополнительная характеристика – показатель плотности сложения (относительная плотность сложения):

$$J_D = \frac{e_{max} - e_{ест}}{e_{max} - e_{min}} = \frac{\Delta e_\phi}{\Delta e_{max}}, \quad (8.9)$$

$\Delta e_\phi$  - фактическое снижение коэффициента пористости по сравнению с максимальным коэффициентом,

$\Delta e_{max}$  - полное возможное изменение коэффициента пористости,

$e_{min}$  и  $e_{max}$  - коэффициенты пористости грунта в максимально плотном и рыхлом состояниях,

$e_{ест}$  - коэффициент пористости в естественных условиях основания (или сооружения).

При  $e = e_{max}$  - самое рыхлое сложение

$e = e_{min}$  - самое плотное сложение

При  $J_D = 0 - 0,33$  - грунты рыхлые

$J_D = 0,33 - 0,66$  - грунты средней плотности

$J_D = 0,66 - 1,0$  - грунты плотные.

## 8.5 Влияние различных факторов на уплотняемость грунтов

Уплотняемость грунтов – это относительная способность грунта повышать свою первоначальную плотность под различными воздействиями.

На уплотняемость грунтов влияют многие факторы:

- естественная структура и физические свойства,
- механический состав грунта (гранулометрический состав),
- влажность грунта,
- начальная плотность,
- толщина уплотняемого слоя,
- число проходов по одному месту,
- способ уплотнения и параметры машин.

Другими словами:

$$\rho_{ск} = \varphi(\text{ф.м. свойства } (f_{тр}, \tau), \rho_{нач.ск.}, \omega, h_{сл}, n_{прох}).$$

### 1. Влияние структуры и физико-механических свойств

Как известно, грунты состоят из трех фаз: твердой, жидкой, газообразной. Частицы мелкой твердой фазы разделяют по крупности на:

глинистые -  $< 0,002$  мм кристаллические частицы пластинчатой или чешуйчатой формы;

пылеватые –  $0,05-0,002$  мм в основном сферической формы аморфное строение;

песчаные –  $2,0-0,05$  мм разной формы.

Свойства грунтов в основном определяются содержанием в них глинистых фракций, а так же минералогическим составом последних. Глинистые частицы придают грунту связность, которая выражается в том, что между отдельными частицами возникают силы притяжения, в результате которых частицы как бы склеиваются. С этих позиций различают грунты:

связные > 12 % глинистых частиц,  
мало связные 4-11 %,   
несвязные < 3 %.

Глинистые частицы имеют очень небольшую толщину < 0,1 мм, но большую удельную поверхность. Например, 1 гр. высушенного грунта имеет площадь в несколько десятков м<sup>2</sup>. Твердые минеральные частицы несут на себе электрический заряд, благодаря чему взаимодействуют с жидкой фазой – водой и удерживают молекулы воды. Этот слой воды, непосредственно прилегающий к поверхности частиц, имеет аномальные свойства и обнаруживает свойства твердых тел, т.е. обладает упругостью, прочностью на сдвиг, пределом текучести.

В результате связности из отдельных частиц образуются агрегаты и вся масса грунта структурируется. Принято различать микро - и макро - агрегатные структуры. Микроагрегаты – песчаные образования из отдельных частиц. Макроагрегаты – вторичные образования из микроагрегатов.

Грунт поступает в насыпи из выемок, претерпев воздействие машин, т.е. с нарушенной естественной структурой и состоит из отдельных комьев. Структура и сцепление внутри комьев сохраняются в естественном прежнем состоянии (виде). Общая же структура нарушена.

Задача уплотнения восстановить нарушенные связи, а может быть даже усилить их. Чем больше связности, тем труднее обеспечить перемещение частиц, а, следовательно, и уплотнение.

## **2. Влияние неоднородности грунтов (грансостава)**

Гранулометрический состав характеризует соотношение различных фракций в составе грунта и обычно выражается соответствующими кривыми (рис8.3).

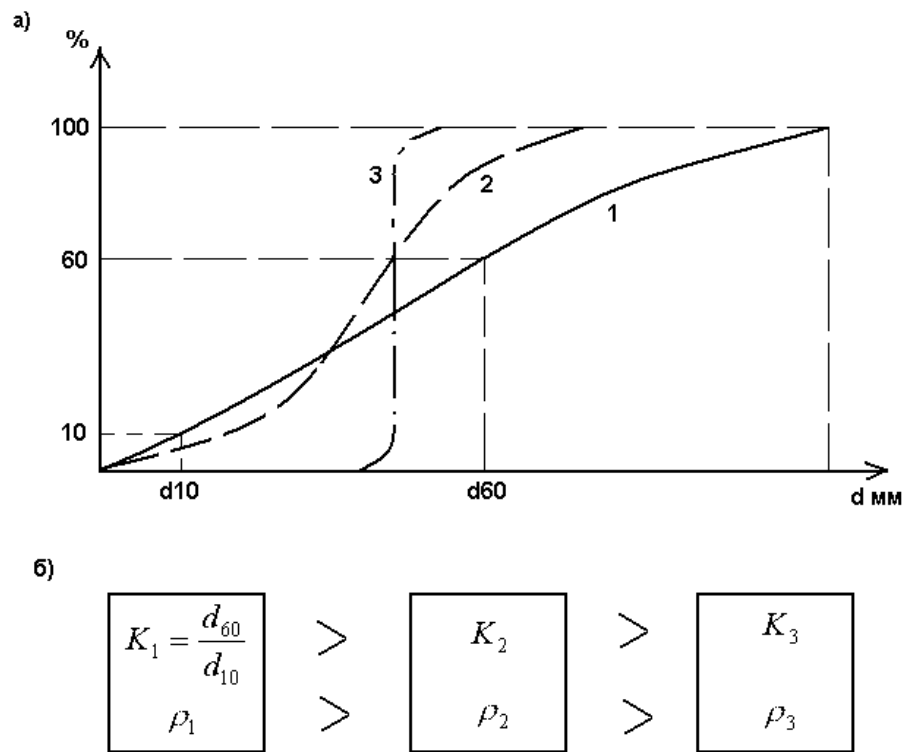


Рис.8.3. Влияние неоднородности грунтов  $\left( K = \frac{d_{60}}{d_{10}} \right)$  на плотность грунтов.

а) кривые гранулометрического состава грунтов различной степени неоднородности (1, 2, 3),

б) сравнительные характеристики грунтов различной степени неоднородности (1, 2, 3).

Для характеристики неоднородности песчаных и крупнообломочных грунтов введен коэффициент неоднородности:

$$K_{60/10} = \frac{D_{60}}{D_{10}}, \quad (8.10)$$

где  $D_{60}$  - диаметр частиц, меньше которых в грунте находится 60% частиц (контролирующий диаметр),

$D_{10}$  - диаметр частиц, меньше которых в грунте находится 10% частиц (эффективный диаметр).

Чем больше  $K_{60/10}$ , тем грунт неоднородней.

При  $K=1$  – грунт предельно неоднородный.

Более интенсивно уплотняются разнородные несвязные грунты.

### 3. Влияние влажности

Вода в грунте подразделяется на:

- связную (прочносвязную и рыхлую), которая за счет электрических и адсорбционных сил удерживается на поверхности частиц,
- свободную – подчиняющуюся действию гравитационных сил.

Количество связанной воды находится в зависимости от удельной поверхности частиц и минералогического состава, т.е. от количества глинистых частиц.

Влажность грунта оказывает особенно большое влияние на физико-механические свойства грунтов.

По мере повышения влажности связанный грунт из монолитного сравнительно очень прочного, но хрупкого, превращается в пластичную массу, а затем переходит в пластичное состояние. Пластичное состояние связанного грунта по влажности принято ограничивать двумя характерными значениями влажности:

$W_p$  - влажность на пределе пластичности,

$W_L$  - влажность на пределе текучести.

Разница между ними – число пластичности.

Число пластичности принято в основу строительной классификации грунтов по влажности.

$$J_p = W_L - W_p : \quad (8.11)$$

супеси  $J_p = 1\% - 7\% (0,01 - 0,07)$ ,

суглинки  $J_p = 7\% - 17\% (0,07 - 0,17)$ ,

глины  $J_p > 17\% (> 0,17)$ .

Если проследить влияние влажности на уплотнение сыпучих грунтов, то можно выявить следующую закономерность (рис.8.4).

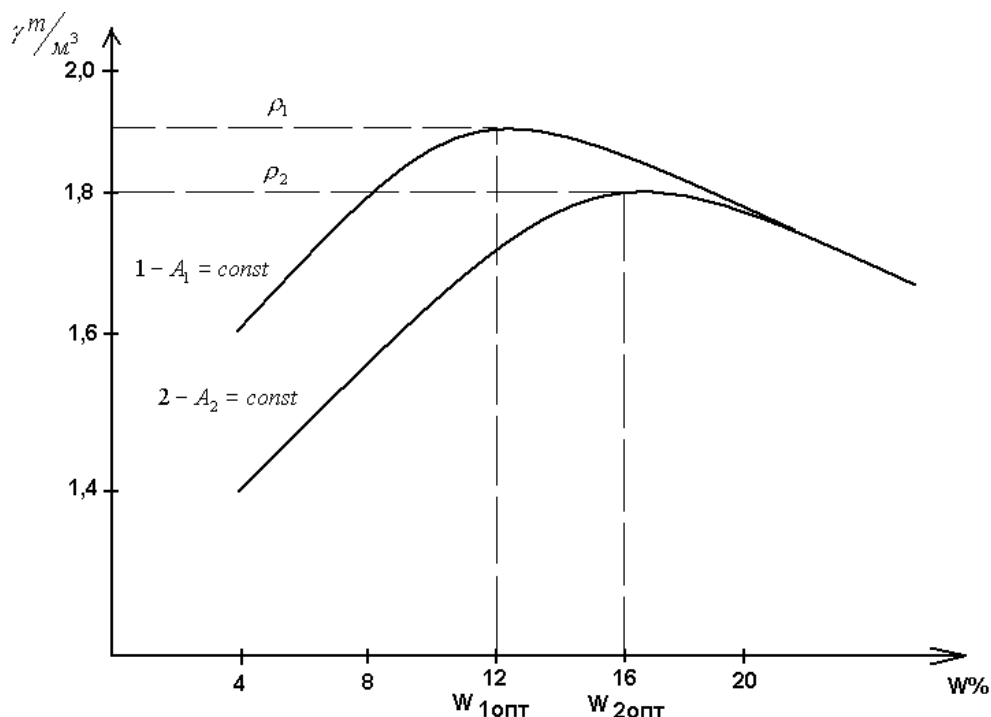


Рис.8.4. Влияние влажности на плотность грунтов.

Значения  $W_{ест}$ ,  $W_{опт}$  и  $\rho_{пред}$ :

Грунт	Влажность		Наибольшая плотность, т/м <sup>3</sup>
	естественная $W_{ест}$	Оптимальная $W_{опт}$	
Песчаный	8-12	8-12	1,7-1,9
Супесчаный	10-15	9-16	1,8-2,1
Суглинистый	20-28	10-18	1,7-1,7
Глинистый	25-35	17-21	1,5-1,8

В соответствии с этим при отсыпке грунтов влажность должна соответствовать оптимальной, для чего – доувлажнение или подсушивание.

#### 4. Влияние числа проходок и толщины уплотняемого слоя

Уплотнение грунта зависит и от толщины уплотняемых слоев и от числа проходок. Тонкие слои дают более равномерное уплотнение. Повышение числа проходок повышает и плотность. Вначале интенсивно. После 4-6 проходок интенсивность падает (рис.8.5), а после 10-12 проходок - почти прекращается. Необходимое число повторных проходов устанавливается по опытному уплотнению. Обычно это 6-8 раз.

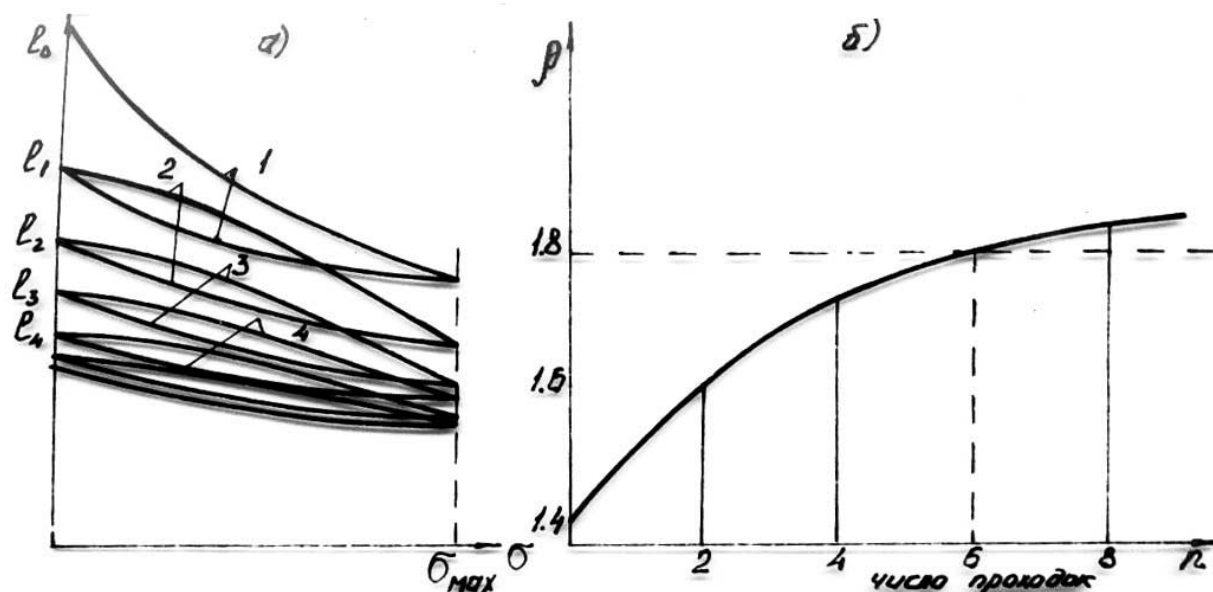


Рис.8.5. Влияние числа проходок (ударов) на плотность.

а) Изменение коэффициента пористости грунта ( $e$ ) от сжимающих напряжений ( $\sigma$ ) и количества проходок (1,2,3,...),

б) Изменение плотности уплотняемого слоя  $\rho$  от количества проходок ( $n$ ).

Максимальная толщина слоя, при которой еще достигается требуемая плотность (как правило, не менее  $\rho_d$ ), называется предельной толщиной слоя. Но для ее достижения требуется большое количество проходок. Поэтому

выбирают так называемую оптимальную толщину. Она составляет примерно 80-90% от предельной величины.

$$h_{опт} = (0,8 \div 0,9)h_{пред}. \quad (8.12)$$

## 5. Влияние рабочего органа и контактных напряжений

Что касается конкретной толщины оптимального слоя для различных машин, то она зависит во многом как от физико-механических свойств грунтов, так и от конкретных размеров машин, которые определяют как общие нагрузки, так и площади передачи этих нагрузок, т.е. контактные напряжения. При этом следует иметь в виду следующее:

Проведенные опыты показали, что действие нагрузки распространяется вглубь грунта на  $3,5d_{ш} - h_{макс} \approx 3,5d_{ш}$ , где  $d_{ш}$  - приведенный диаметр штампа.

Но напряжения по глубине уменьшаются и плотность по глубине будет различная, поэтому толщина уплотняемого слоя не может быть равной глубине предельной проработки.

На распределение напряжений по глубине влияет наличие жесткого основания. При отсутствии жесткого основания (рис.8.6а) напряжения распределяются по классической (теории) кривой Буссинеска.

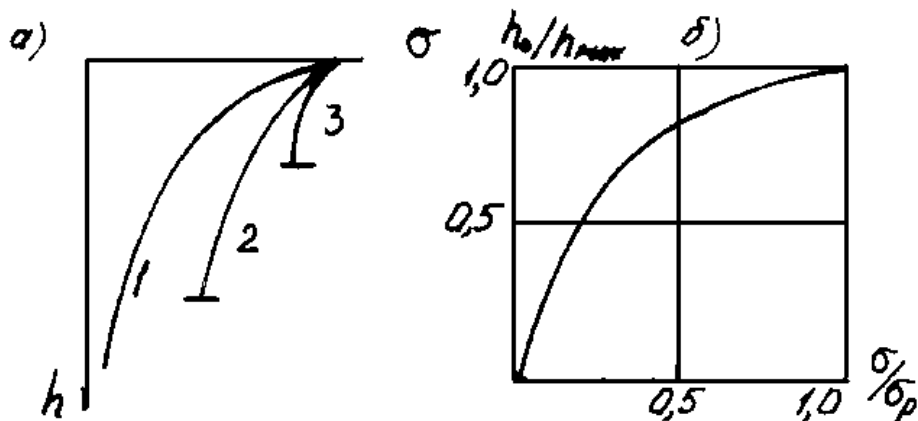


Рис.8.6.(а,б). Влияние различных факторов на распределение напряжений по глубине и величину активной зоны.

а) Распределение напряжений по глубине в зависимости от толщины слоя уплотнения (от положения жесткого основания).

1. при полупространстве (Кривая Буссинеска),
2. при большой толщине слоя,
3. при малой толщине слоя.

б) Зависимость активной зоны  $h_0/h_{макс}$  от величины контактного давления  $\sigma/\sigma_p$ .

При приближении жесткого основания распределение напряжений выравнивается. В итоге имеется зона, где деформация грунта по глубине распространяется более или менее равномерно. Эту зону называют активной,

а ее глубину – глубиной активной зоны. В ней реализуется 80-90% всей необратимой деформации грунта. При таких условиях глубина активной зоны близка к  $2d_{ш}$ .

$$H_{акт} \approx 2d_{ш}$$

глубина активной зоны  $h_0$  зависит и от контактного давления  $\sigma_0$  (рис.8.6в).

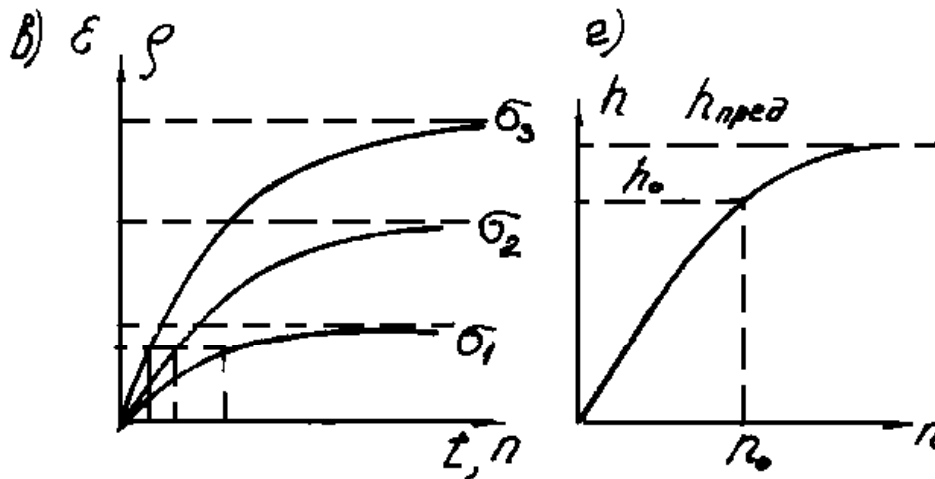


Рис.8.6.(в,г). Влияние различных факторов на распределение напряжений по глубине и величину активной зоны.

в) Зависимость деформаций  $\xi$  или плотности грунта  $\rho$  от времени уплотнения или числа повторных действий нагрузки при разных контактных давлениях  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ .

г) Зависимость глубины активной зоны от числа проходов (ударов).

Максимальное напряжение  $\sigma_{0\max} = \sigma_p$  - предел прочности грунта.

**Общая формула для определения глубины активной зоны и оптимальной толщины слоя.**

В целом, для расчета глубины активной зоны  $H_{акт}$  может быть предложена следующая формула:

$$H_{акт} = \alpha B_{\min} \frac{W}{W_0} (1 - e^{-\beta \frac{\sigma_0}{\sigma_p}}) = \varphi(B_{\min}, \frac{W}{W_0}, \sigma_0, \sigma_p), \quad (8.13)$$

где  $B_{\min}$  - минимальный поперечный размер поверхности контакта рабочего органа;

$\sigma_p$  - предел прочности грунта при его оптимальной влажности;

$\sigma_0$  - контактное давление;

$W$  - влажность грунта;

$W_0$  - оптимальная влажность грунта;

$\alpha, \beta$  - коэффициенты:

$\alpha = \varphi$  (скорости изменения напряженного состояния или длительности приложения нагрузок); при укатке  $\alpha \approx 1,7 - 2,0$ , при трамбовании  $\alpha = 1,1$ ; т.е.

$$\alpha = \varphi\left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta t}, \Delta t_{нагр}\right);$$

$\beta = \varphi$  (вида грунта); для связных грунтов  $\beta = 3,7$ .

Толщина уплотняемых слоев:

$$H_{сл.опт} \leq H_{акт} \quad (8.14)$$

$H_{сл.опт}$  - толщина, при которой достигается требуемая степень уплотнения при наименьшей затрате механической работы.

При условии  $\rho_d \leq 0,95\rho_{max}$  оптимальная толщина слоя может быть принята равной глубине активной зоны:

$$H_{сл.опт} = H_{акт} = 2d_{и} \quad (8.15)$$



## Тема 9. Способы уплотнения грунтов

### 9.1 Классификация способов

В зависимости от способа воздействия на грунт для его уплотнения, т.е. для перемещения частиц и их более компактной укладки, различают следующие способы уплотнения:

- машинами статического действия (укаткой),
- машинами динамического действия,
- машинами комбинированного действия,
- отсыпкой грунта в воду.

В свою очередь уплотнение машинами статического действия подразделяется на уплотнение:

- гладкими катками,
- пневмошинными катками,
- кулачковыми катками,
- решетчатыми катками

в зависимости от формы наружной поверхности барабана (шины) катка.

### 9.2 Уплотнение машинами статического действия – укаткой

#### 1. Уплотнение гладкими катками

Сущность этого способа – уплотнение за счет силового воздействия на грунт в период движения катка. (рис.9.1).

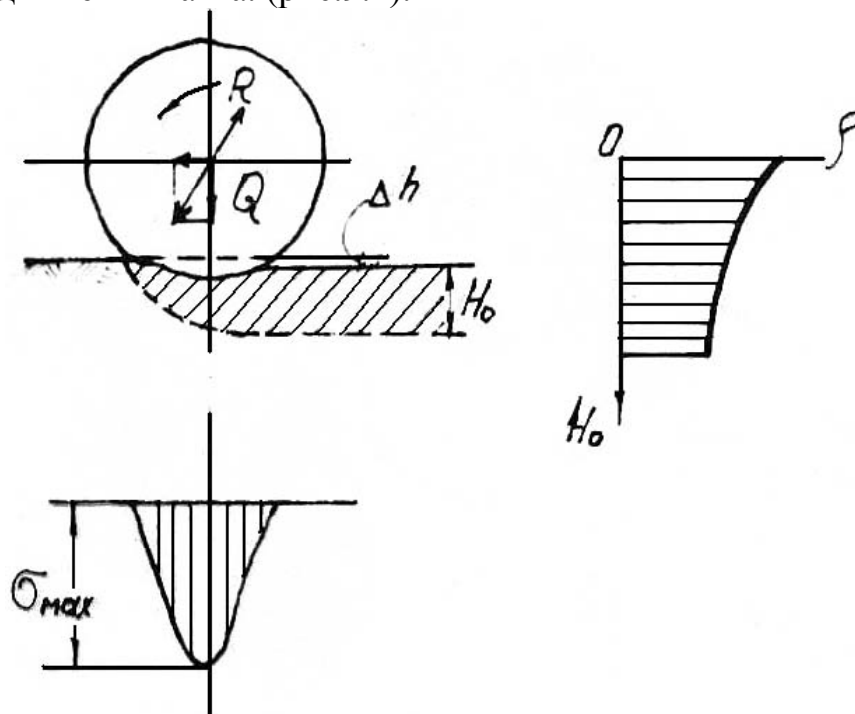


Рис 9.1. Схема уплотнения гладким катком.

$q_l = \left(\frac{Q}{B}\right)$  - линейное среднее удельное давление,

$\omega, \omega_0$  – влажность естественная, оптимальная,

$R$  – радиус катка,

$F$  – модуль упругости катка,

$B$  – ширина катка.

По мере движения катка в каждой точке грунта проходит волна напряжений и под действием напряжений происходит перегруппировка частиц.

Катки с гладкими вальцами имеют наибольшее распространение. Преимущество – простота конструкции. Недостатки – неравномерная передача напряжений на грунт и неравномерность уплотнения в пределах толщи. Эффект уплотнения зависит от параметров (размеров) катка – веса  $Q$ , линейного давления на грунт -  $q_x$ , радиуса барабана  $R$  и режима уплотнения (числа проходов  $n_{\text{прох}}$ , скорости движения катка  $V_{\text{катка}}$ ).

Максимальное давление:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{q_l \frac{E_0}{R}} = \varphi(q_l, \frac{E_0}{R})$$

$$H_{\text{опт}} = A \frac{\varpi}{\omega_0} \sqrt{q_l R} = \varphi\left(\frac{\omega_0}{\omega}, q_l, R\right), \quad (9.1)$$

$$q_l = \frac{Q}{B} \text{ кгс/см}$$

где  $q_l$  - линейное среднее удельное давление на грунт,

$E_0$  - модуль упругости грунта,

$\varpi_e, \varpi_0$  - соответственно естественная и оптимальная влажности,

$R$  – радиус барабана катка,

$B$  – ширина катка,

$A$  – экспериментальный коэффициент (для сыпучих грунтов  $A=0,35$ , для связных грунтов  $A=0,28$ ).

## 2. Уплотнение пневмошинными катками (рис.9.2)

Сущность – та же.

Преимущество – деформируется не только грунт, но и сама шина, что приводит к относительно более равномерному распределению напряжений в грунте по глубине (рис.9.2).

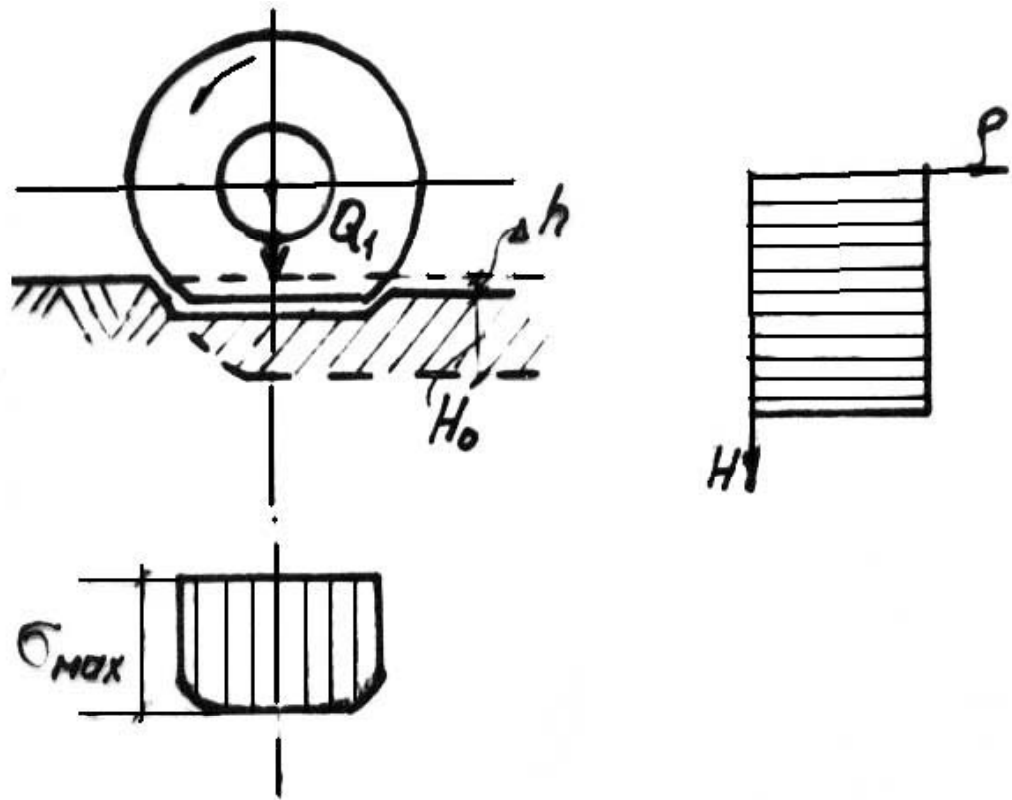


Рис.9.2. Схема уплотнения пневмошинным катком.

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{1-\xi} = \varphi\left(\frac{P}{\xi}\right)$$

$$H_0 = A \frac{\pi}{\omega_0} \sqrt{\frac{Q_1 P}{1-\xi}} = \varphi\left(\frac{\omega_0}{\omega_0}, \frac{Q_1 P}{\xi}\right), \quad (9.2)$$

$Q_1$  - сила тяжести, приходящаяся на одно колесо,

$P$  - давление в шинах, кгс/см<sup>2</sup>,

$\xi$  - статический коэффициент жесткости покрышки, зависящий от давления в шинах (изменяется от 0,6 до 0,16 при изменении давления от  $P=1$  до  $P=6$  кгс/см<sup>2</sup>),

$A$  - экспериментальный коэффициент (для пневмошинных катков  $A=0,75$ ).

### 3. Уплотнение кулачковыми катками

Сущность метода – уплотнение (т.е. перегруппировка частиц) за счет повышенного давления под кулачком (рис.9.3).

Различают три зоны уплотнения по глубине:

$h_1$  – при заглублении разрыхления, а также, при уплотнении вышележащего слоя,

$h_2$  – грунт уплотняется за счет сдвига в боковую поверхность при заглублении кулачка,

$h_3$  – зона ниже опорной поверхности кулачка, где грунт уплотняется вертикальной нагрузкой.

Способ эффективен в связных грунтах, где требуются повышенные напряжения. Нагрузка на один кулачек должна быть разрушающей для данного грунта, но не такой, чтобы кулачек вдавливался на всю высоту.

$$\sigma_{\max} = \frac{Q}{f \left(\frac{m}{2}\right)} = \varphi(Q, f, m) \leq [\sigma] \quad (9.3)$$

$$H_0 = 0,65(h_k + 0,25b_k - h_1) = \varphi(h_k, b_k),$$

где  $Q$  - вес катка,

$f$  - площадь кулачка,

$m$  - количество кулачков в ряду,

$h_k$  - высота кулачка, см,

$b_k$  - толщина кулачка, см,

$h_1$  - толщина верхнего разрыхленного слоя после прохода кулачком,

$[\sigma]$  - допустимое удельное давление на опорную поверхность кулачков.

Рекомендуемые  $[\sigma] \approx 7-15$  кгс/см<sup>2</sup> для легких суглинков,

15-40 кгс/см<sup>2</sup> для средних суглинков,

30-60 кгс/см<sup>2</sup> для тяжелых суглинков и глин.

Т.е.  $[\sigma] = \varphi$  (от типа и свойств грунта).

### 9.3 Уплотнение машинами динамического действия

Уплотнение происходит под действием удара. Рабочими органами трамбующих машин являются плиты различных размеров, различного веса и формы, которые сбрасываются с различных высот (рис.9.4, 9.5).

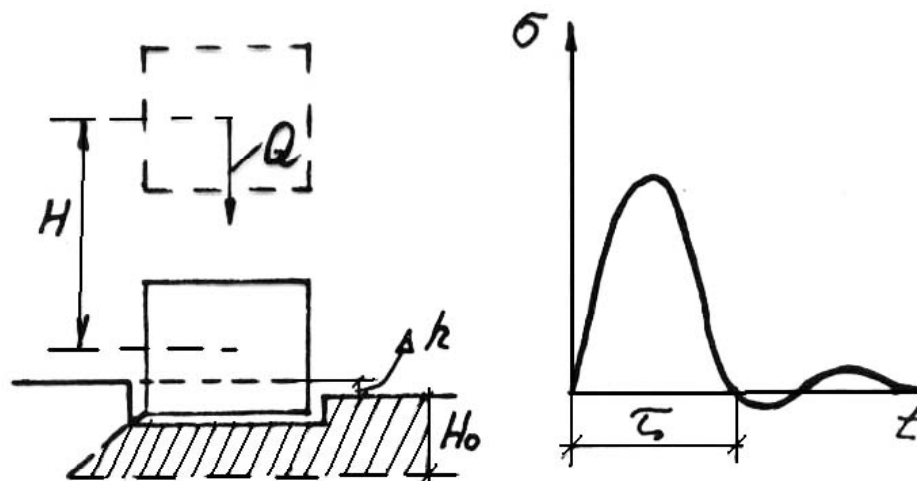


Рис.9.4. Схема уплотнения грунта трамбовкой.

$$\sigma_{\max} = \varphi \left( \frac{Q \cdot H}{\tau \cdot F_{nl}} \right); \quad H_0 = \varphi(i_{пред})$$

$$i = \frac{Q \cdot \sqrt{2gH}}{gF} = \frac{mV}{F} \quad \frac{\text{кгс} \cdot \text{с}}{\text{см}^2}$$

$V$  – кинетическая энергия,

$F$  – площадь,

$i$  – удельный импульс,

$i_{пред} = 40 \div 60 \cdot 10^{-3}$  – для легких грунтов, супесей,

$i_{пред} = 175 \div 225 \cdot 10^{-3}$  – для вязных тяжелых грунтов,

$H_0 = 0.3 \text{ м}$  при  $i = 20 \cdot 10^{-3}$

$H_0 = 1.35 \text{ м}$  при  $i = 180 \cdot 10^{-3}$

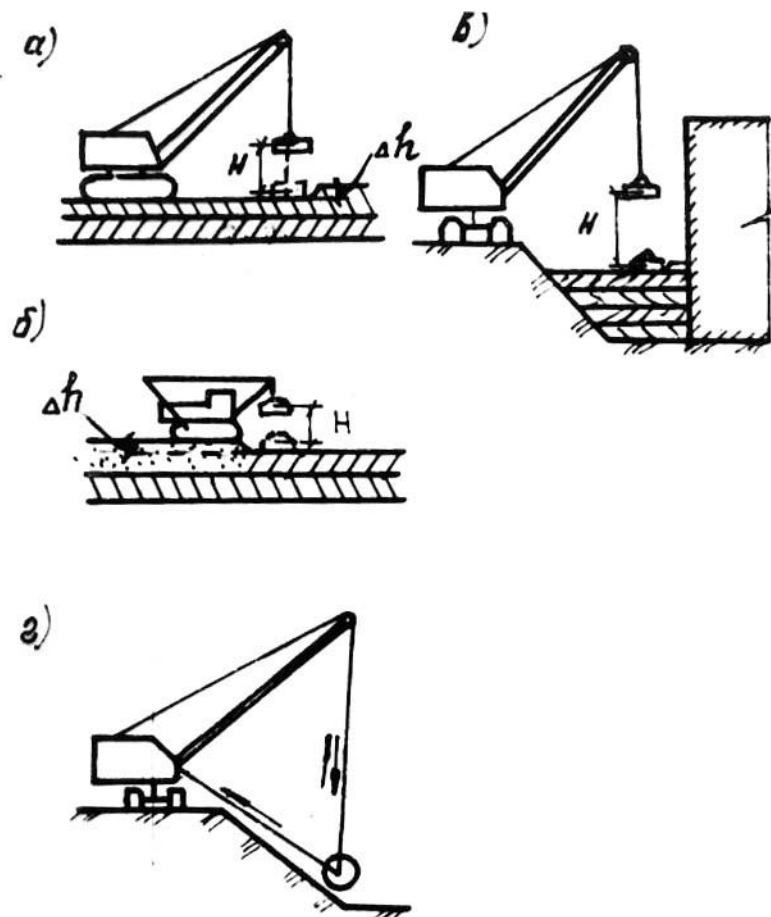


Рис.9.5 Уплотнение грунта трамбованием.

а) трамбующими плитами на базе крана – экскаватора;

б) трамбующими плитами при обратной засыпке котлованов в стесненных условиях;

в) трамбующей машиной на базе гусеничного трактора;

г) вальцевой трамбовкой на крутых откосах.

Действие удара протекает в короткий промежуток времени. Кинетическая энергия падающей плиты передается частицам грунта, вызывая их перемещение и плотную укладку. Сопротивление по мере внедрения плиты увеличивается, а отсюда и сила удара изменяется от максимума в момент соприкосновения до 0 в конце погружения.

$$P = \varphi\left(\frac{QH}{\tau\Delta h}\right)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{2q\sqrt{2gH}}{g\tau F}, \quad (9.4)$$

где  $Q$  - вес грунта,

$H$  - высота падения груза,

$\tau$  - продолжительность удара,

$\Delta h$  - глубина погружения за один удар,

$g$  - ускорение силы тяжести,

$F$  - площадь ударного элемента (плиты).

При повторяющихся ударах величина  $\Delta h$  уменьшается, сокращая продолжительность  $\tau$  и сила удара возрастает. Отсюда степень уплотнения можно регулировать не только силой тяжести, но и числом ударов  $n$ .

Так как напряжение  $\sigma$  зависит от трудно определяемой величины продолжительности удара  $\tau$ , было предложено (проф. Харкута Н.Я.) определять параметры трамбуемых машин по показателю удельного импульса:

$$J = \frac{Q\sqrt{2gH}}{gF}, \text{ тс.с/см}^2$$

$$H_0 = \varphi(J_{\text{пред}}). \quad (9.5)$$

Опытами установлены предельные импульсы  $J_{\text{пред}}$  для различных грунтов, зная которые возможно определить необходимые параметры.

$J_{\text{пред}} = (40-60)10^{-3}$  кгс с/см<sup>2</sup> – для легких грунтов,

$J_{\text{пред}} = (175-225)10^{-3}$  кгс с/см<sup>2</sup> – для связных тяжелых грунтов.

Оптимальная толщина слоя  $H_0$  возрастает с возрастанием  $J_{\text{пред}}$ .

Например:

при  $J_{\text{пред}} = 20 \cdot 10^{-3}$   $H_0 = 0,3$  м,

при  $J_{\text{пред}} = 180 \cdot 10^{-3}$   $H_0 = 1,35$  м.

На связных грунтах можно получить большую глубину уплотнения, чем на несвязных. Имеются примеры уплотнения больших глубин до 10 м и более. При этом вес груза (плиты) достигает десятков тонн.

#### 9.4 Уплотнение машинами вибрационного действия

Сущность метода – уплотнение – перегруппировка частиц за счет их колебаний, вызванных вибрационными машинами. Машины вибрационного действия сообщают грунту частые колебательные движения. Связи между частицами разрушаются. Из-за их разных сил инерции и импульсов происходит взаимное перемещение и более компактная укладка – уплотнение.

Процесс вибрации также значительно уменьшает условные коэффициенты вынужденного трения грунтов, что уменьшает сопротивление частиц трению. Так сухой мелкозернистый песок имеет коэффициент внутреннего трения до вибрации – 0,5, во время вибрации – 0,07, а после вибрации – 0,85.

Эффективность уплотнения зависит от энергии вибрации  $P_b$ , разнородности грунта  $K_p$ , влажности  $\omega$ , частоты и амплитуды вибрации  $n, A$ , времени вибрации  $t_b$ .

$$\mathcal{E}_{\text{эффект}} = \rho(P_b, K_p, \omega, n, A, t_b)$$

Энергия вибрации

$$\rho_b = \frac{mV^2}{r},$$

$$H_0 = \varphi(P_b, n, A, V_{\text{угл}}), \quad (6.6)$$

где  $P_b$  - энергия вибрации,

$m$  - масса дебаланса,

$V$  - окружная скорость,

$r$  - эксцентриситет дебаланса,

$n$  - частота колебаний,

$A$  - амплитуда колебаний,

$V_{\text{угл}}$  - угловая скорость.

Увеличение  $n$  увеличивает эффективность уплотнения. Для виброуплотнения применяют машины разных типов – чисто вибрационные или комбинированные – виброударного действия. Последние наиболее эффективны. Типы машин: виброплиты, вибротромбовки, виброкатки. Толщина слоев колеблется от 0,2 до 1,2м.

### ***Разновидности вибрационного уплотнения:***

Большой интерес представляет глубинное гидровиброуплотнение (рис.9.6).

При этом используют стержневые электровибраторы с одновременной подачей воды в зону уплотнения. Применяется для рыхлых и малосвязных грунтов. Стоимость виброуплотнения велика.

Уплотнение взрывами – разновидность вибрационного уплотнения – применяется для несвязных грунтов – песков.

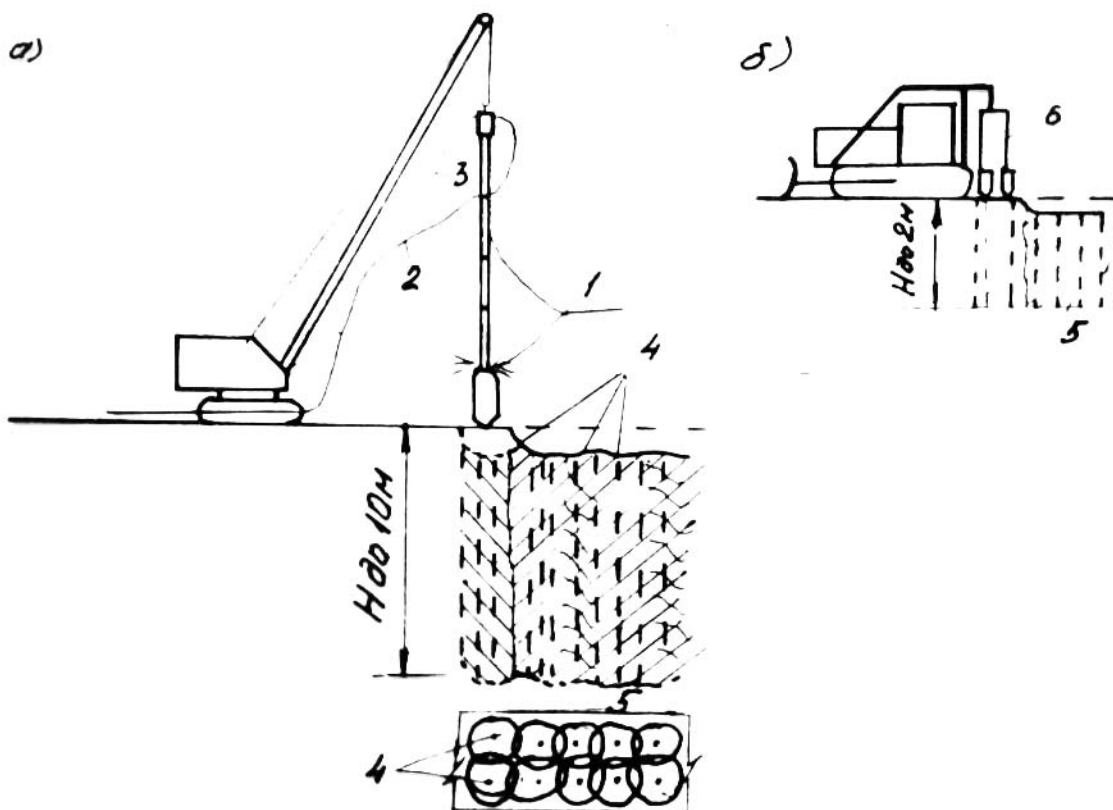


Рис.9.6. Уплотнение грунта глубинными вибраторами  
 а) на глубине до 10 метров,  
 б) на глубине до 20 метров,  
 1 – тяжелый гидровибратор,  
 2 – подвод воды,  
 3 – подвод электроэнергии,  
 4 – места погружения глубинных вибраторов,  
 5 – зона уплотнения грунта,  
 6 – глубинные вибраторы на штангах.

## 9.5 Самоуплотнение замочкой и отсыпкой в воду

Один из древних приемов уплотнения – замочка насыпей.

Принцип – обильное увлажнение (до полного насыщения) вызывает потерю связности, распад агрегатов, оплывание макропар, что способствует более плотной укладке частиц. Уплотнение замочкой лессов сопровождается значительной деформацией насыпей.

Развитием этого способа является отсыпка грунта непосредственно в воду (рис.9.7).



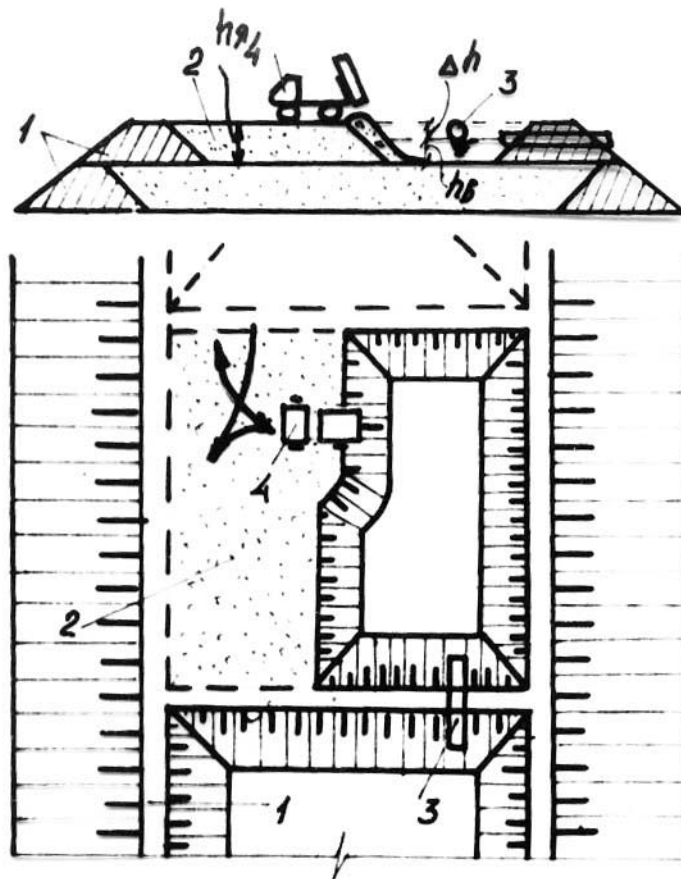


Рис.9.7. Схема укладки грунта отсыпкой в воду

1. Дамбы обвалования
2. Ярус отсыпанного грунта в воду (карта отсыпки)
3. Труба для пропуска воды на соседние карты укладки
4. Транспорт

Применялся с древних времен для возведения насыпей из лессовых грунтов.

Очередной слой укладываемого грунта отсыпают в воду – в пруд в обвалованном пространстве.

В последние годы способ усовершенствовался путем дополнительного уплотнения машинами (бульдозерами, а/с, скреперами).

Высота слоя больше глубины воды. Укладка в воду обеспечивает распад агрегатов, ликвидацию макропористости, в результате чего получается монолитная структура достаточной плотности и водопроницаемости. Существенное влияние оказывает гидродинамическое действие воды.

$$\rho_{ск} = \varphi(H_{сл}, J_{отс}, \text{типа грунта}),$$

где  $H_{сл}$  - толщина слоя,

$J_{отс}$  - интенсивность отсыпки.

## 9.6 Особенности уплотнения крупнообломочных грунтов

Крупнообломочные грунты – скальные дробленые породы (каменная наброска).

Отсыпка производится так же слоями.

Способы (рис.9.8):

- 1) малыми слоями (1-3,0м) с уплотнением тяжелыми катками (иногда гружеными автосамосвалами),
- 2) большими слоями (10-15м) с уплотнением гидромониторами,
- 3) с замывом песка.

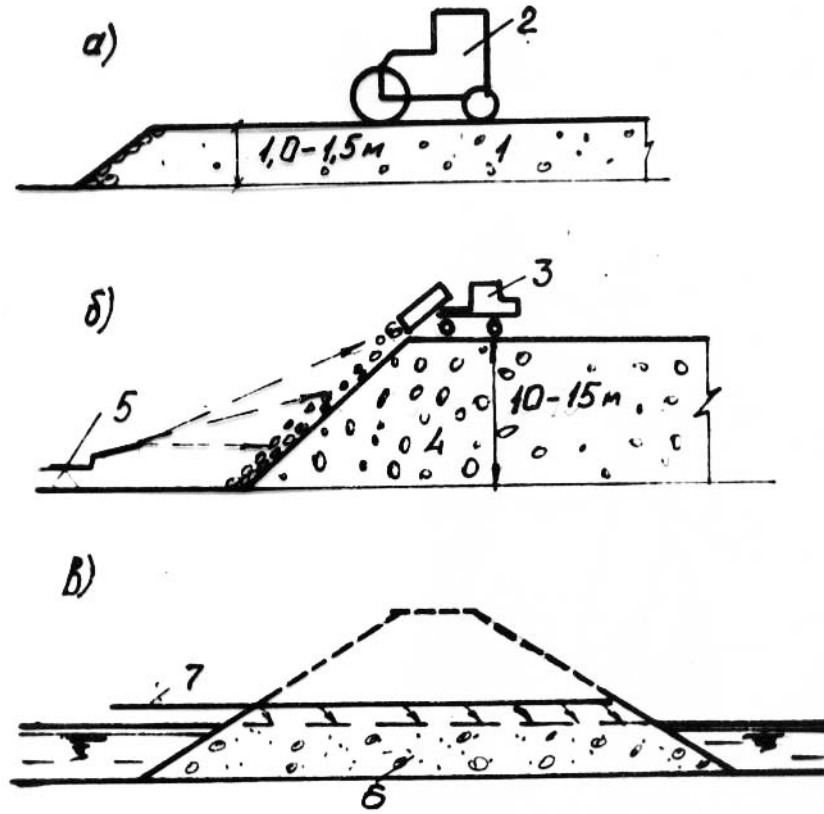


Рис.9.8. Схемы уплотнения крупнообломочных (скальных) грунтов

а) тяжелыми катками и гружеными а/с

б) гидромониторной струей

в) замывом песка

1 – разнородная горная масса с большим содержанием мелочи

2 – каток (груженые а/с)

3 – автосамосвал

4 – горная масса с ограниченным содержанием мелочи

5 – гидромонитор

6 – горная масса с ограниченным содержанием мелочи с замывом песком

7 – подача песчаной пульпы для замыва

Первый способ - при отсыпке разнородной горной массы с большим содержанием мелочи.

$$H_{сл} > 3D_{max}$$

Второй способ – для отсыпки отсортированных скальных пород для исключения сегрегации при сбрасывании с откоса. Расход воды гидромонитора 1-4 м<sup>3</sup> на 1м<sup>3</sup> наброски.

Третий способ – при необходимости повышения надежности плотины (Ассуанская плотина).

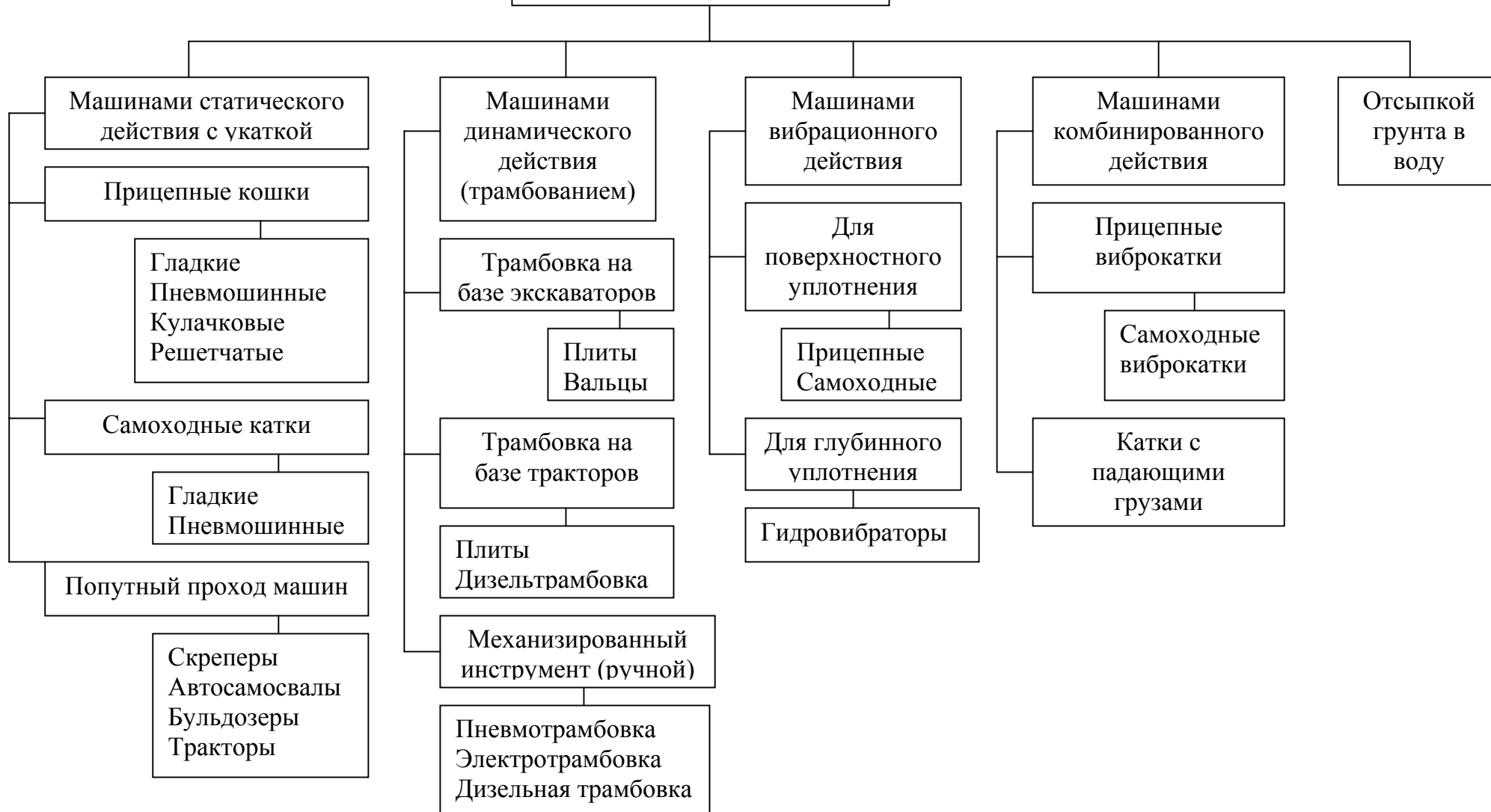
Для возможности замыва – специальные требования к наброске с ограничением мелочи (мелочь <100мм – 50-60%).

Явление расслоения материала по крупности при падении на откосе называется сегрегацией.

Для снижения сегрегации:

- применение грунта с меньшей разнородностью,
- уменьшение толщины отсыпаемого слоя,
- оптимальное увлажнение грунтов.

# Способы уплотнения грунта



## Тема 10. Возведение качественных насыпей

### 10.1 Особенности возведения неоднородных качественных насыпей (каменно-набросных и каменно-земляных плотин)

В этих плотинах можно выделить следующие элементы (рис.10.1):

- упорные призмы,
- ядро,
- переходные зоны и фильтры.

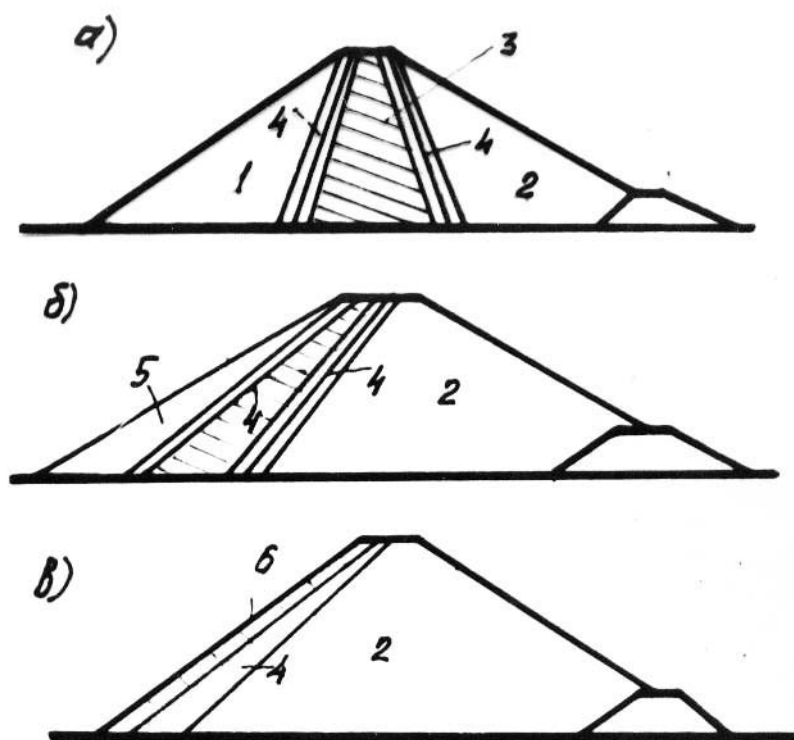


Рис.10.1. Типы неоднородных насыпей (плотин) из крупнообломочных грунтов

а) каменно – земляная плотина с ядром

б) каменно – земляная плотина с экраном

в) каменно – набросная плотина

1, 2 – верховая и низовая упорные призмы из крупнообломочных грунтов

3 – ядро из связных грунтов

4 – переходные слои и фильтры

5 – защитный слой

6 – экран из негрунтовых материалов (ж/б, металл)

Для упорных призм применяется любой крупнообломочный материал (камень). Для высоких плотин – его сортировка и зональная укладка. Более мелкий и менее прочный – во внутренние зоны. Прочный и крупный – в наружные. Желательна равнозернистая горная масса ( $50\% > 200$  мм).

$$d_{пред} = \rho(h_{сл}, q, q_{тр}) < \left(\frac{1}{2} \div \frac{1}{3}\right) h_{сл}$$

Все элементы плотины возводят одновременно, но с некоторым опережением одной части над другой в зависимости от конструкции.

В плотинах с экраном применяется опережение упорных призм (рис. 10.2).

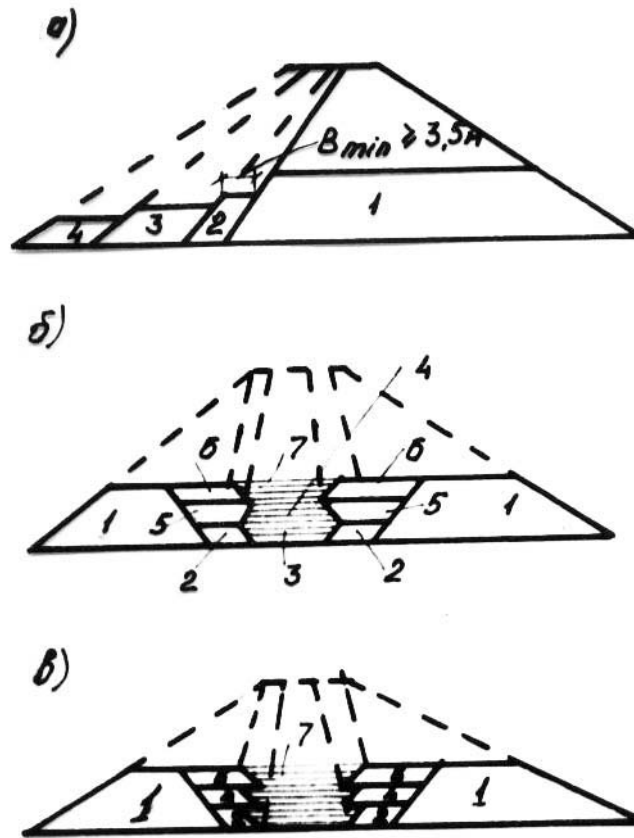


Рис.10.2.Схемы отсыпки разнородных плотин

а)плотина с экраном

б) плотина с ядром при отсыпке ядра “Елочкой”

в) плотина с ядром при отсыпке ядра “Ступеньками”

1, 2, 3 – очередность отсыпки

$B_{\min} \geq 3.5$  м - для прохода трактора и катков.

В плотинах с ядром – практически одновременно возведение по всему

Укладка переходных зон и фильтров осуществляется как правило “Елочкой”, сохраняя углы естественного откоса и последовательно смещая слои относительно друг друга.

Обычно идут с отсыпки призмы, а - с укладки то призмы, то ядра.

Иногда – зубчатая укладка с опережением (отставанием) сначала призмы, затем переходного слоя, и затем экрана (рис.10.3, 10.4).

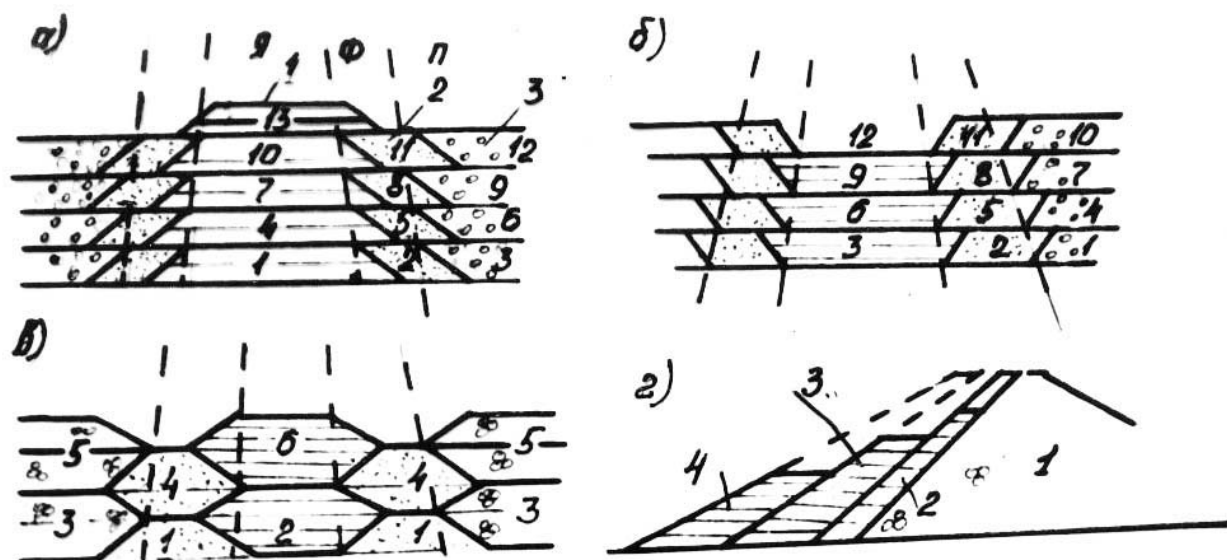


Рис.10.3. Схемы отсыпки профильтрованных элементов плотин (детали)  
 а) с опережением ядра  
 б) с отставанием ядра  
 в) комбинированная  
 г) независимая отсыпка экрана  
 1, 2, 3 – последовательность отсыпки

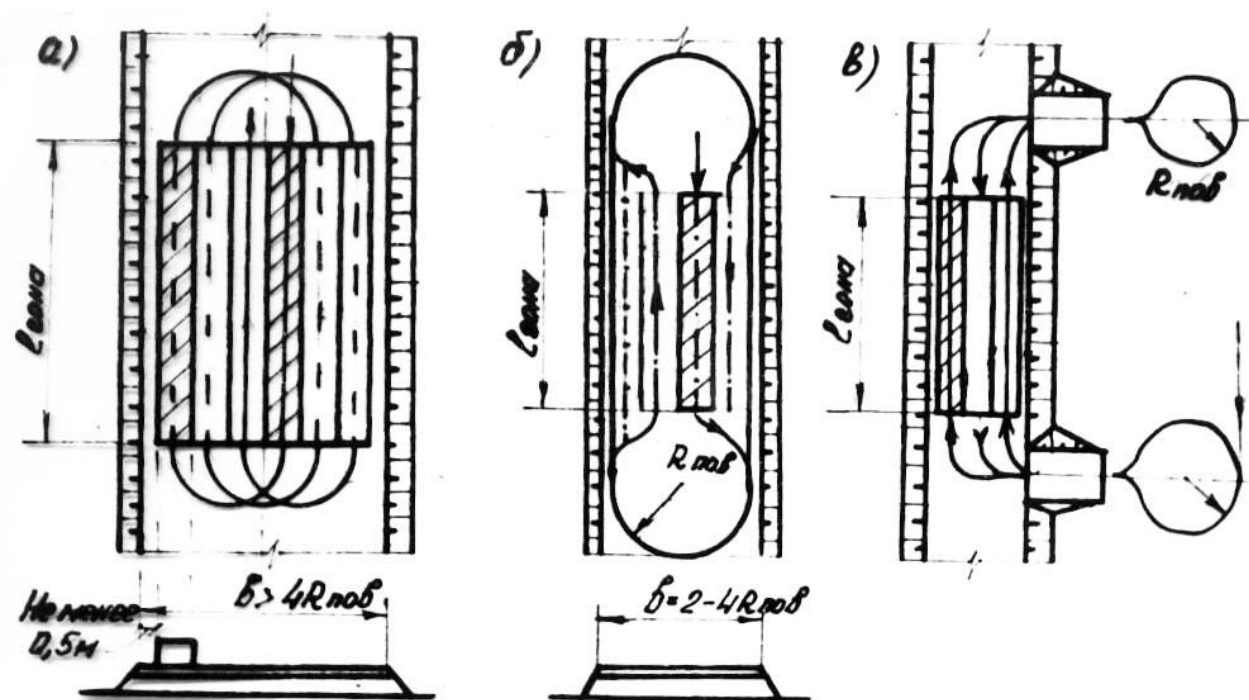


Рис.10.4. Схемы движения катков при уплотнении грунта в насыпях разной ширины  
 а) широкая насыпь  $b > 4R_{\text{кат}}$   
 б) насыпь с шириной  $b = 2 - 4R_{\text{кат}}$   
 в) насыпь с шириной  $b < 2R_{\text{кат}}$  со съездами

Уплотнение каждого элемента своими силами и механизмами, которые рассмотрены ранее.

## 10.2 Производительность грунтоуплотняющих машин

Таким образом, для уплотнения применяются различные типы машин. Среди них – машины непрерывного действия и машины циклического действия.

### *А. Производительность машин непрерывного действия (катков)*

Общая формула для этих машин:

$$\Pi = F'_{nom} \cdot V \cdot K_B \text{ - при проходке по одному слою}$$

$$\text{При } \Pi \text{ - в } \frac{M^3}{\text{час}}$$

$$F'_{nom} = F'_{nom} \cdot K_3$$

$$F'_{nom} = B \cdot H_{cl}$$

$$K_3 = \frac{B - B_{nep}}{B}$$

Тогда при одном проходе по слою

$$\Pi = B \cdot H_{cl} \left( \frac{B - B_{nep}}{B} \right) V \cdot K_3 = (B - b_{nep}) H_{cl} \cdot V \cdot K_6$$

где  $F'_{nom}$  - площадь потока при полной ширине катка,

$F'_{nom}$  - расчетная площадь потока с учетом  $K_3$ ,

$V$  - скорость передвижения агрегата (катка)  $\frac{KM}{\text{час}}$

$B$  - ширина уплотняемой полосы

$b_{nep}$  - ширина полосы перекрытия  $(0.15 \div 0.2)B$

$n$  - число проходов по одному следу

$K_6$  - коэффициент используемого внутрисменного времени  $(0.75 \div 0.85)$

При проходе  $n$  раз по полосе,  $\Pi$  в  $n$  раз меньше

$$\Pi = \frac{B - B_{nep}}{B} H_{cl} \cdot V \cdot K_6 \quad \frac{M^3}{\text{час}}$$

При необходимости исчисления производительности в  $M^2$

$$\Pi = \frac{B - B_{nep}}{B} V \cdot K_6$$



### Б. Для машин циклического действия.

$$П = q_{ц} \cdot n_{ц} = q_{ц}' \cdot K_3 \cdot n_{ц} \cdot K_в$$

$$q_{ц}' = F_{тр}$$

$$K_3 = K_{пер} = \frac{F_{усл}'}{F_{тр}} - \text{коэффициент использования площади плиты } (\approx 0,8)$$

$$q_{ц}' \cdot K_3 = F_{тр} \frac{F_{усл}'}{F_{тр}} = F_{усл}'$$

$$П = F_{усл}' \cdot n_{ц} \cdot K_в \quad \text{м}^2/\text{час} - \text{при одном ударе по одному месту}$$

При N ударах

$$П = \frac{F \cdot K_{пер} \cdot n_{ц}}{N} K_в \quad \text{м}^2/\text{час}$$

При оценке производительности в  $\text{м}^3/\text{час}$

$$П_V = П_F \frac{\text{м}^2}{\text{час}} \cdot H_{сл} \frac{\text{м}^3}{\text{час}}$$

$H_{сл}$  - толщина слоя

### 10.3 Расчет параметров потока

а) Необходимая суммарная производительность механизмов

$$П_{см(мес)} \geq I_{см(мес)} = \frac{V_{ном}}{T} K_{нсп} \quad \text{м}^3/\text{смену(мес)}$$

$V_{ном}$  - общий объем грунта в данном потоке (призма, ядро, переходные зоны)

$T$  - общий срок производства работ смена (мес)

б) Общая площадь одновременно отсыпаемых партий

$$\sum F_K = П_{см} \cdot \frac{T_{см}}{H_0}$$

$П_{см}$  - сменная производительность ведущего механизма

$T_{см}$  - продолжительность работы на

$H_0$  - толщина отсыпаемого слоя в уплотненном состоянии

в) Площадь

$$F_K = b \cdot l$$

$b, l$  - ширина и длина карты =  $\varphi$  (типа катка, схемы работы, размера сооружения,  $\sum F_K$ )

$l = 50 \div 100$  м - для самоходных катков

$l$  до 200 м - для прицепных

$l = 250 \div 300$  м - для кулачковых катков

г) Число одновременно отсыпаемых карт

$$n_K = \frac{\sum F_K}{F_K} - \text{целое число (за счет уточнения } f_K)$$

д) Общее число карт на уровне отсыпки