

МАШИНЫ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА CAT®

# РУКОВОДСТВО ПО УПЛОТНЕНИЮ ГРУНТА

МАШИНЫ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА CAT®  
РУКОВОДСТВО ПО УПЛОТНЕНИЮ ГРУНТА

**CATERPILLAR**

**CATERPILLAR**





**CAT** CS78B



**МАШИНЫ ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА CAT®**

# РУКОВОДСТВО ПО УПЛОТНЕНИЮ ГРУНТА

**CATERPILLAR®**

Настоящее *Руководство по уплотнению грунта* опубликовано компанией Caterpillar® Paving Products. Были предприняты все усилия для того, чтобы технические характеристики и другая информация в этой публикации соответствовали истине. Информация по эффективности эксплуатации приводится только для справки. В связи с большим числом переменных факторов, характеризующих конкретный объект уплотнения грунта (включая типы и характеристики грунтов, добавки, влажность, техническое задание, имеющуюся технику, индивидуальные предпочтения владельца техники по ее применению, эффективность работы операторов оборудования, состояние нижних слоев грунта, высоту над уровнем моря и т. д.), компания Caterpillar Inc. и ее дилеры не могут гарантировать того, что результаты применения машин и технологий, описанных здесь, будут соответствовать ожиданиям. Поскольку содержащиеся в данной публикации технические характеристики оборудования и другая информация могут изменяться без предварительного уведомления, следует уточнить у местного дилера компании Caterpillar последнюю информацию о продукции и наличие возможного дополнительного оборудования. Показанные на иллюстрациях машины могут содержать дополнительное оборудование и/или навесное оборудование. CAT, CATERPILLAR, их логотипы, «желтый цвет Caterpillar», стиль внешнего оформления POWER EDGE, а также идентификационная символика компании и ее продукции, используемые здесь, являются торговыми знаками Caterpillar и не могут использоваться без разрешения.

**Примечание:** для получения информации о конкретной продукции обязательно обращайтесь к соответствующему руководству по эксплуатации и техническому обслуживанию компании Caterpillar. Некоторые машины, показанные на иллюстрациях, могут включать оборудование, купленное уже после продажи машины, которое не было изготовлено или испытано компанией Caterpillar.

ISBN: 978-1-939945-05-1

QRBQ1705

© 2013 Caterpillar Inc. – Все права охраняются законом.

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Раздел 1:</b>	ОСНОВЫ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ	8
<b>Раздел 2:</b>	ТИПЫ И СИСТЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ ГРУНТОВ	30
<b>Раздел 3:</b>	ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПЛОТНЕНИЯ	38
<b>Раздел 4:</b>	ПРАКТИКА УПЛОТНЕНИЯ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА	58
<b>Раздел 5:</b>	ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПЛОТНЕНИЕ	90
	ПРИЛОЖЕНИЕ	112
	ГЛОССАРИЙ ТЕРМИНОВ	118

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Грунты всегда были самым распространенным в мире строительным материалом. Со времен использования грунтов древними римлянами для строительства дорог до современного строительства дамб – качественное уплотнение всегда было необходимо для обеспечения надежности насыпей и того, что на них построено. В наши дни такие проекты, как строительство дорог, насыпей, дамб и склонов, обязательно сопровождаются контролируемые уплотнительными работами, для того чтобы обеспечить соответствие техническим критериям качества. Если на стадии строительства не удастся обеспечить качественное уплотнение, ремонтные расходы на протяжении срока эксплуатации сооружения могут превысить первоначальные строительные расходы.

Грунты являются не только самым распространенным строительным материалом, но и самым разнообразным. Размер и форма частиц, минералогический состав, влажность, примеси и время – все эти составляющие вносят свой вклад в разнообразие грунтов. В настоящем руководстве описываются причины разнообразия и делается акцент на выбор правильного оборудования для эффективного и производительного ведения уплотнительных работ. Процесс выбора уплотнительного оборудования и технологий закладки грунтов преимущественно опирается на эмпирические правила или наработки, существовавшие в прошлом. Однако с ускорением темпов строительных работ и переходом на технические

задания, ориентированные на конечный результат, от уплотнительных работ все в большей степени зависит успех проекта, даже несмотря на то, что на них приходится лишь малая часть всех строительных расходов.

В настоящем руководстве излагаются основы технологий уплотнения, вопросы выбора эффективных уплотнительных машин и описываются появляющиеся технологии испытаний для оценки качества с целью оптимизации затрат времени на уплотнение и сокращения строительных расходов. Указания по выбору машин основываются на типе материала, необходимой толщине слоя отсыпки, требуемой производительности и требованиях к критериям оценки качества (например, к степени уплотнения, модулю упругости основания).

Особенно полезным настоящее руководство может оказаться для подрядчиков, стремящихся собирать и использовать информацию о грунте до начала проекта, поскольку они смогут составить смету работ для конкретного объекта и планы процесса уплотнения, направленные на правильное выполнение работ с первого раза без последующих дорогостоящих доработок и задержек строительства.

Технологии измерения уплотнения, такие как Cat® Compaction Control, позволяют теперь отслеживать ход уплотнения по таким показателям, как толщина слоя, обработанная зона, метод измерения степени





уплотнения (CMV) и показатель уплотнения Machine Drive Power (MDP). Показатель CMV – это известный параметр, позволяющий уплотнительным машинам самостоятельно осуществлять измерения и получать значения механических параметров грунта (например, жесткости, прочности) на основе вибрационного анализа системы «машина-грунт». MDP – это новая, передовая технология, разработанная компанией Caterpillar, которая еще больше расширяет возможности подобных систем.

Измерение механических параметров уплотняемых материалов в реальном времени с привязкой к информации о положении, получаемой при помощи системы GNSS (Всемирная навигационная спутниковая система), позволяет получать карты оценки качества работ в условной расцветке. Эти карты можно привязать к проектным значениям, чтобы гарантировать, что уплотненные материалы отвечают установленным критериям качества. Такой подход к оценке качества уплотнения намного опережает старый метод визуального контроля слабых мест. Если раньше технические нормы в области уплотнения преимущественно включали технические требования на методы, которые предписывали технологию ведения работ, то сейчас применение объединенных технологий позволяет использовать технические задания на конечный результат со 100-процентным покрытием в реальном масштабе времени. Фактически интеллектуальные технологии уплотнения послужили основой для переосмысления

контроля качества уплотнения организациями во всем мире.

Настоящее руководство аккумулирует опыт и знания, полученные компанией Caterpillar в ее упорной работе по усовершенствованию техники и технологий уплотнения. Свой вклад в составление настоящего руководства внесли многие действующие подрядчики, инженеры, признанные авторитеты и исследователи. Появившиеся технологии уплотнения, особенно интегрированный мониторинг интеллектуального уплотнения и методы прогнозирования рабочих параметров, станут причиной наиболее значительных изменений в области контроля качества уплотнения с 1933 г., когда Проктор установил стандарты для контроля влажности.

Читатели этого руководства держат в своих руках полезный материал, в котором изложены принципы уплотнения грунта, экспертная информация о выборе машин и рекомендации по оптимизации процесса уплотнения. Публикация этой информации в рамках данного руководства снизит риски и повысит качество уплотнения.

Дэвид Джей Уайт (David J. White), кандидат наук  
Доцент университета штата Айова







## ВВЕДЕНИЕ

Те, кто хочет строить, должны понимать необходимость уплотнения.

Компания Caterpillar рада представить настоящее *Руководство по уплотнению грунта*. Оно содержит принципы уплотнения, методы испытаний и процедуры, используемые на рабочем объекте. Содержание ориентировано на практичный подход к довольно сложной теоретической теме. Данное руководство – плод опыта, накопленного за многие десятилетия в области производства земляных работ, а также знаний, полученных с помощью множества людей, работавших с компанией Caterpillar на протяжении многих лет.

Если вы являетесь профессиональным строителем, государственным чиновником, преподавателем или студентом или если вы просто хотите больше узнать о строительных технологиях, это руководство станет для вас ценным источником информации.

Консультации по землеройно-транспортным или уплотнительным работам также можно получить у вашего местного дилера компании Caterpillar. Дилеры прошли обучение у экспертов компании Caterpillar для того, чтобы помочь вам, предлагая оборудование, техническое обслуживание и знания, делающие вашу работу максимально продуктивной.



## РАЗДЕЛ 1 ОСНОВЫ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ

Умение анализировать состав грунта крайне важно для разработки проектной документации на уплотнение и для последующего достижения требуемой несущей способности.



### [ ЧТО ТАКОЕ УПЛОТНЕНИЕ? ]

Говоря простым языком, уплотнение – это процесс повышения плотности материала механическими средствами. Плотность грунта увеличивается за счет устранения воздушных полостей между образующими грунт частицами. С течением времени рыхлый материал оседает и естественным образом уплотняется. Благодаря применению различных видов механического воздействия, время, требуемое для уплотнения, измеряется уже не годами, а часами.

Уплотнение – процесс, необходимый при строительстве почти любого объекта, включая автомобильные и железные дороги, аэродромы, площадки под застройку и фундаменты зданий, трубопроводы, дамбы, каналы, дренажные трубы и т. д. Если грунт должен служить основанием для сооружения, уплотнение обычно необходимо для того, чтобы придать устойчивость сооружению.

Уплотнение грунта осуществляется за счет одного или нескольких из следующих воздействий: статическое давление, удар, манипуляция и вибрация.





**[ ПОЧЕМУ УПЛОТНЕНИЕ ИМЕЕТ ВАЖНОЕ ЗНАЧЕНИЕ? ]**

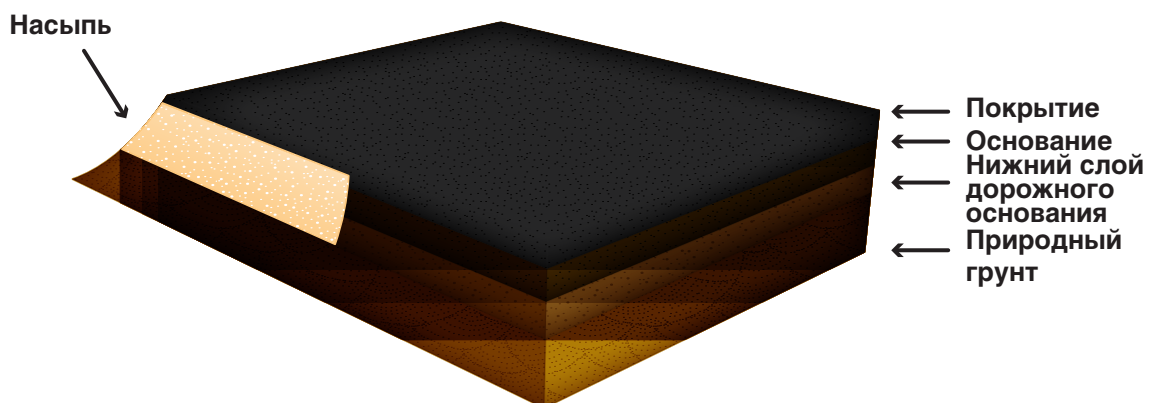
Хорошо уплотненный материал способен выдерживать существенные нагрузки без деформации (без прогиба, образования трещин, сдвигов). Материал, служащий опорой для тяжелого сооружения, должен быть очень плотным. В противном случае он будет все более уплотняться под действием нагрузки, что приведет к просадке сооружения. Плотный материал обладает более низкой проницаемостью, что снижает влияние от просачивания воды. Кроме того, уплотнение выравнивает поверхность и выявляет структурно слабые места.

Хорошим примером, иллюстрирующим важность уплотнения, может служить многослойная конструкция типичной автодороги. Каждый слой проезжей части имеет свое технически оправданное назначение и служит опорой конструкции, вес которой давит на него сверху. Каждый слой должен сооружаться из требуемого материала, иметь необходимую толщину и жесткость. Если хотя бы один слой окажется недостаточно прочным, такая дорога станет непригодной к эксплуатации.

Уплотнение происходит во время всех этапов строительства дороги. Качество уплотнения оказывает существенное влияние на срок службы дороги, на комфортность и, возможно, на безопасность – из-за движения по ней общественного транспорта.

Из всех составных элементов, вносящих вклад в увеличение срока службы дороги, процесс уплотнения является наименее дорогостоящим. Увеличение плотности слоев дорожного полотна во время строительства требует очень малых денежных затрат на кубический метр грунта. Соблюдение требований к плотности, заложенных в проектной документации, способно обеспечить значительную экономию расходов на содержание, текущий и капитальный ремонт дорог в будущем.

**ТИПИЧНОЕ ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ АВТОДОРОГИ**



### [ЧТО ТАКОЕ ГРУНТ?]

Грунты представляют собой неконсолидированные материалы, которые состоят из минеральных частиц, а также могут содержать органические вещества. Грунты преимущественно образованы отложениями измельченной породы, которая медленно разрушалась под влиянием физических и химических процессов.

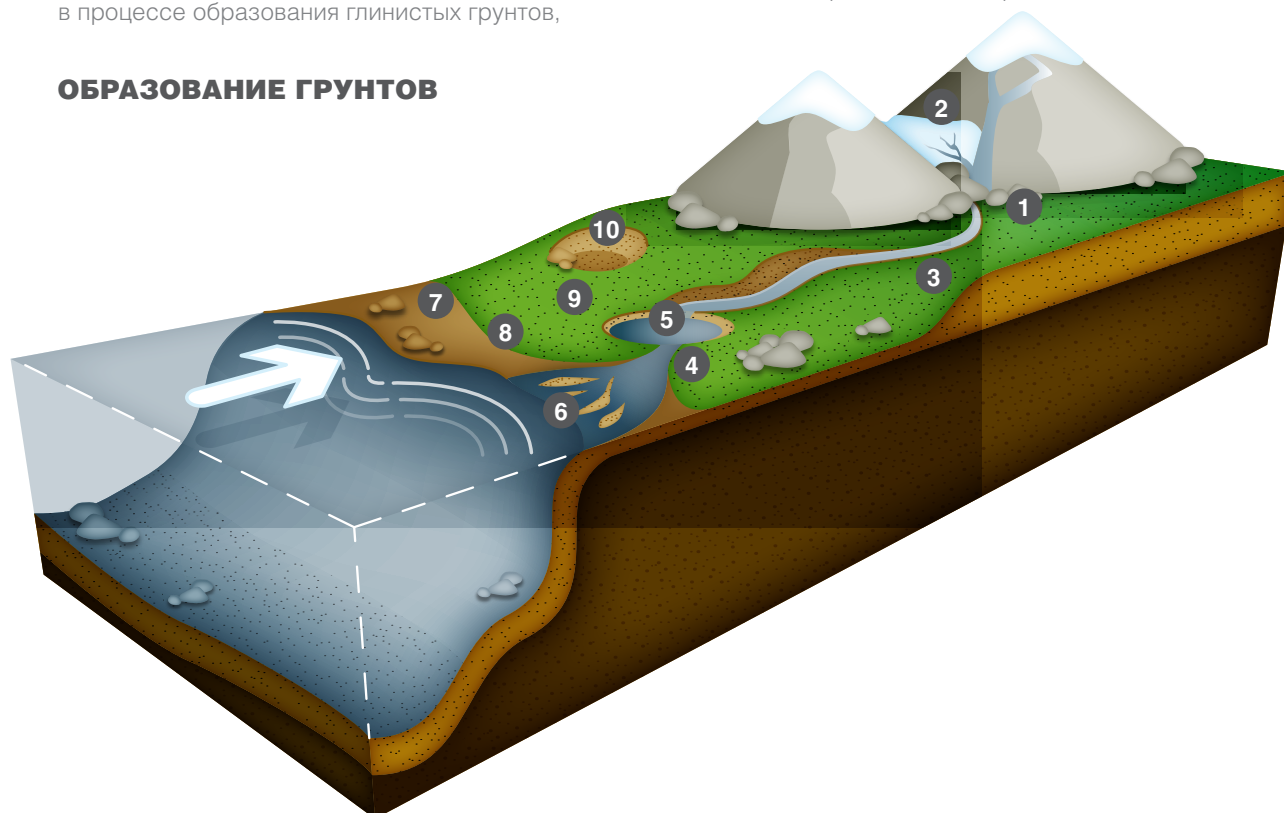
Физические процессы включают замерзание и оттаивание, укатывание, истирание и выветривание.

В результате химических процессов образуются глинистые грунты. Важное значение в процессе образования глинистых грунтов,

происходящего в течение длительного времени, имеют выветривание и выпадение осадков. Глина отличается от песка и гравия тем, что она состоит из крошечных частиц, имеющих пластинчатую форму, которые образуются из различных скальных пород.

Вещества органического происхождения также вносят вклад в образование грунтов. Погибшие растения разлагаются и становятся частью грунта. Следует отметить, что грунты с высоким содержанием органического вещества, как правило, слишком рыхлые и обладают недостаточной несущей способностью для их полноценного применения в строительстве.

### ОБРАЗОВАНИЕ ГРУНТОВ



- 1 Элювий**  
Продукт выветривания скальных пород.
- 2 Ледниковые отложения**  
Материалы, перенесенные или созданные ледниковым покровом.
- 3 Флювиогляциальные отложения**  
Отложения потоков талых ледниковых вод.
- 4 Речные отложения**
- 5 Озерные отложения**
- 6 Аллювиальные грунты**  
Мелкозернистые грунты, осаждающиеся в поймах и устьях при протекании воды.
- 7 Смытые волнами отложения**
- 8 Отложения, образованные ветром**
- 9 Органические грунты**  
Разложившиеся растительные остатки.
- 10 Грунты искусственного происхождения**  
Продукт горно-взрывных работ и дробления.



**[ТИПЫ ГРУНТОВ]**

Несмотря на то что грунты сильно различаются по своему химическому и физическому составу, для инженерно-технических целей принята классификация, в рамках которой выделяется шесть основных типов грунтов: валуны, булыжники, гравий, песок, пылеватый грунт и глина.

Эта классификация основана на гранулометрическом составе грунтов, который определяется по результатам ситового анализа. Технические детали этого анализа могут отличаться в зависимости от страны,

но размеры ячеек сит в большинстве случаев регламентируются системами, разработанными одной из двух следующих организаций: Международной организацией по стандартизации (ISO) [[www.iso.org](http://www.iso.org)] и Американским обществом по испытаниям и материалам (ASTM) [[www.astm.org](http://www.astm.org)]. Эти две системы не совпадают полностью, но очень схожи. Процентное содержание грунта, слишком мелкого для ситового анализа, определяется при помощи гидрометрического анализа (см. стр. 14).

**ТИПЫ ГРУНТОВ**



**Валуны**



**Булыжники**



**Гравий**



**Песок**

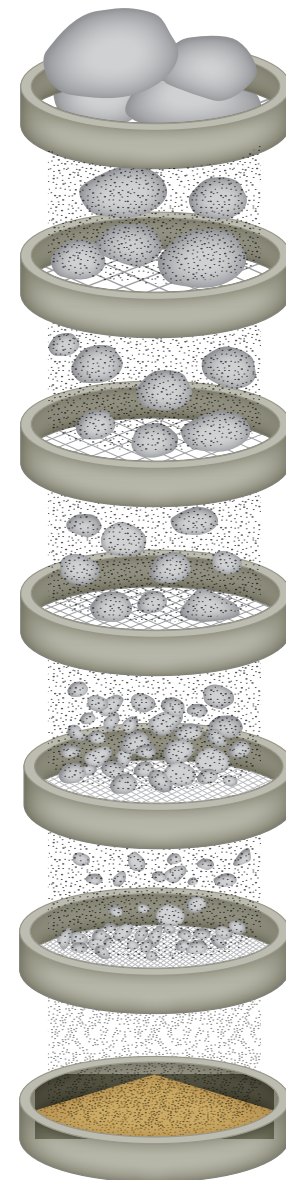


**Пылеватый грунт**

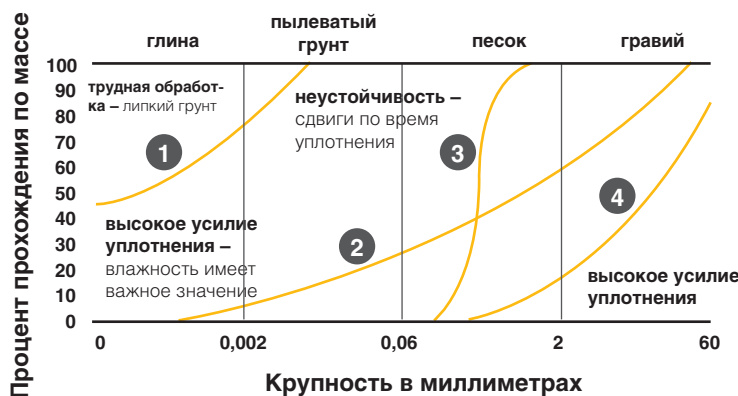


**Глина**

**СИТОВЫЙ АНАЛИЗ**



**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРУ**



- 1 Пылеватый грунт – глина
- 2 Гравий – пылеватый грунт
- 3 Одноразмерный песок
- 4 Гравий – песок

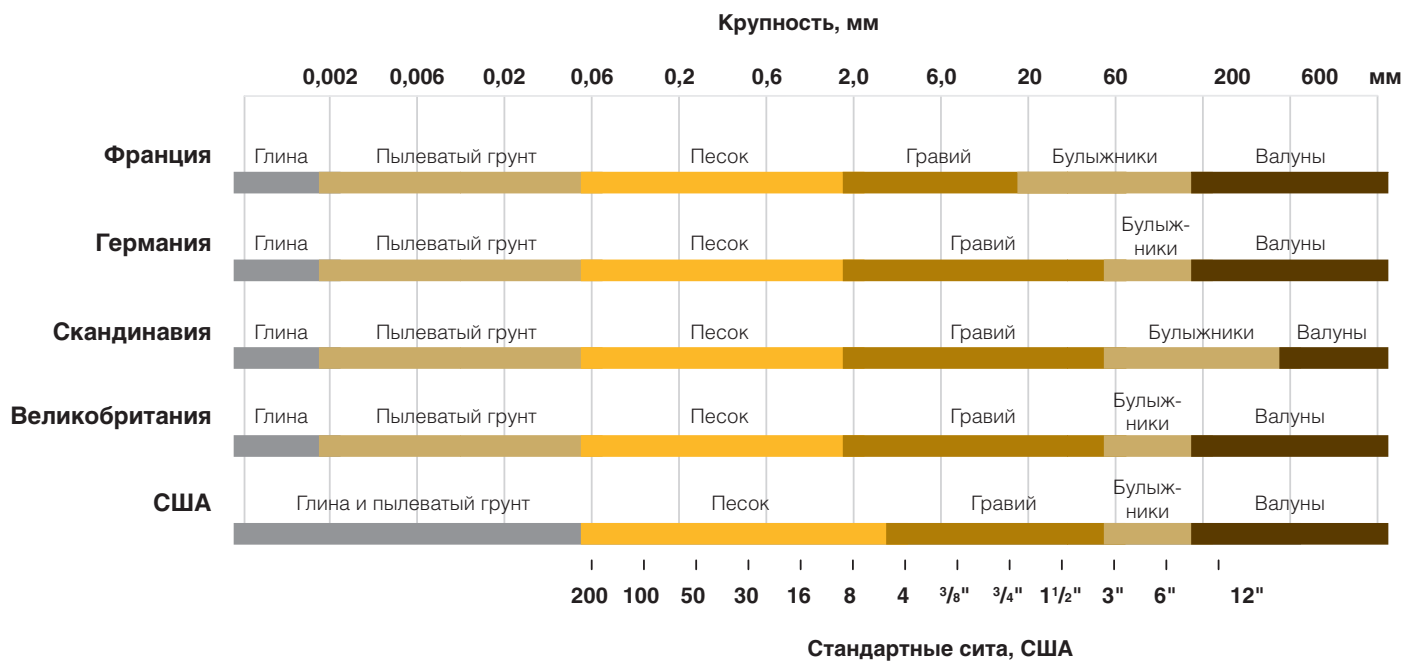
## ОСНОВЫ



### Гидрометрический анализ

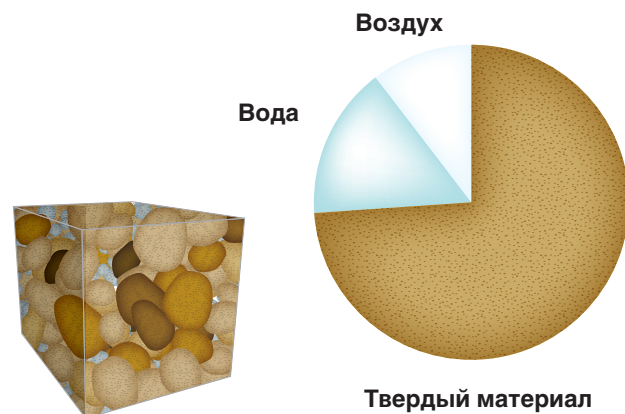
Образец грунта диспергируется (равномерно распределяется) в воде в мерном стакане. По времени, которое требуется для осаждения материала на дно, можно определить гранулометрический состав. Гидрометр используется для определения удельного веса суспензии, что позволяет установить процентное содержание частиц различной крупности.

### КЛАССИФИКАЦИЯ ГРУНТОВ В РАЗЛИЧНЫХ СТРАНАХ



Грунт – это, прежде всего, смесь упомянутых выше типов грунтов в различной пропорции. Важно понять, что грунт состоит не только из твердого материала. Грунт представляет собой смесь твердого материала (любой комбинации типов грунтов), воды и воздуха.

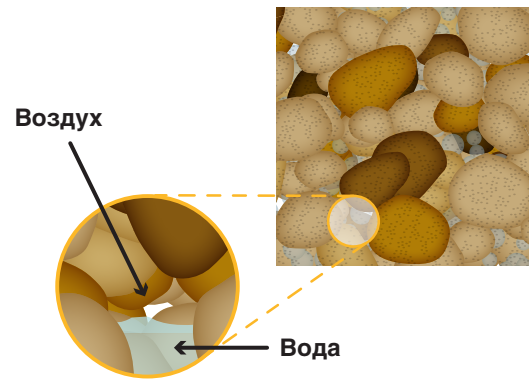
### ГРУНТОВАЯ СМЕСЬ



Природные (неокультуренные) грунты, т. е. грунты, входящие в состав естественных отложений, сильно различаются в зависимости от региона нахождения. Например, грунт никогда на 100 процентов не состоит из глины или песка: всегда присутствует небольшой процент грунтов других типов. Наиболее пригодными для строительства грунтами зачастую являются смеси различных грунтов, состав которых специально подобран в соответствии с технологическими свойствами, которые нужно получить.

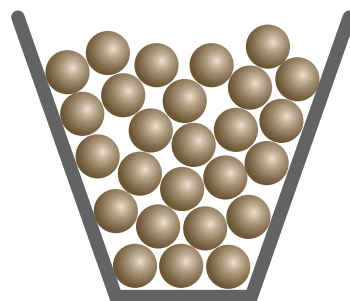
Инженеры-геотехнологи могут проектировать смеси грунтов, обладающие нужными технологическими свойствами, задавая процентное содержание грунта каждого типа. Для получения спроектированного грунта отсутствующие в природном грунте типы грунтов добавляются в нужной пропорции и смешиваются с природным грунтом. Зачастую такие дополнительные материалы находят путем проведения экономического анализа грунтов, которые можно найти поблизости.

**ПУСТОТЫ, ЗАПОЛНЕННЫЕ ВОЗДУХОМ/ВОДОЙ**



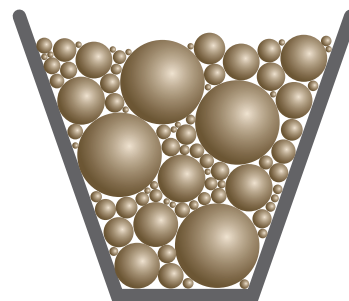
При близком рассмотрении образца грунта можно обнаружить, что в его состав входят частицы различной формы и размеров. Пространство между частицами называют пустотами. Пустоты заполнены воздухом или водой. Грунт, который содержит слишком много воздуха или воды из-за обилия пуст, неустойчив. В процессе уплотнения расположение частиц грунта меняется, объем и размер пустот минимизируется, в результате чего материал приобретает более высокую плотность и устойчивость.

**ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ**



**Одноразмерный, или плохо подобранный**

Грунт состоит из частиц, которые имеют различный размер, даже если разница мала. Распределение частиц по размерам называют зерновым или гранулометрическим составом. В идеале в грунте присутствует приблизительно равное количество частиц всех размеров без преобладания частиц какого-то одного размера. Материал с таким идеальным составом называют материалом с хорошо подобранным гранулометрическим составом.



**Хорошо подобранный**

Материалы, состоящие из частиц приблизительно одного размера, такие как аллювиальные пески, имеют «одноразмерный» или «плохо подобранный» гранулометрический состав. Если в материале отсутствуют частицы одного или нескольких размеров, про такой материал говорят, что он имеет «прерывистый гранулометрический состав». Грунт с хорошо подобранным гранулометрическим составом уплотняется легче, чем грунт с плохо подобранным составом, поскольку, когда частицы различаются по размеру, более мелкие частицы заполняют пустоты между более крупными.

## [ ЧЕТЫРЕ ТИПА ГРУНТОВ ]

Хотя знание точного состава грунта иногда полезно, на практике более важно знать, как реагирует грунт на различные воздействующие силы. Для этой цели профессионалы, работа которых связана с грунтами, разбили грунты на четыре категории:

1. Связные.
2. Полусвязные.
3. Несвязные.
4. Органические.

Каждый из этих типов грунтов ведет себя по-разному при механическом воздействии. Его реакция определяет его пригодность для различных целей в строительстве, а также средства, которые используются для работы с грунтом. Как отмечалось выше, органические грунты непригодны для применения в строительстве.

Если грунт непригоден для выполнения технических задач, его заменяют или применяют различные средства для улучшения характеристик грунта, осуществляя так называемую стабилизацию грунта. Эти способы могут включать химическую стабилизацию – например, путем ввода портландцемента, извести, летучей золы или хлорида кальция – и механическую стабилизацию, т. е. добавление подобранных минеральных заполнителей или использование геоткани для укрепления грунта.

### ТИПЫ ГРУНТОВ



Тип грунта	Органолептические свойства	Движение воды	Влажное состояние	Сухое состояние
<b>Зернистые грунты, мелкий песок и пылеватые грунты</b>	Видны крупные зерна. При растирании между пальцами чувствуется песок.	Если воду и грунт взболтать в ладони, они перемешаются. После прекращения взбалтывания они отделятся друг от друга.	Пластичность отсутствует или очень низкая.	Сила сцепления частиц в сухом состоянии отсутствует или очень мала. Образец грунта легко рассыпается.
<b>Связные грунты, смеси и глина</b>	Зерна невидны невооруженным глазом. При растирании между пальцами ощущается мягкий и пластичный материал.	Если воду и грунт взболтать в ладони, они не перемешаются.	Пластичный и липкий материал. Допускает скатывание.	Высокая прочность в сухом состоянии. Плохо рассыпается. Медленное насыщение в воде.

**[ ВАЖНАЯ РОЛЬ ВЛАЖНОСТИ ]**

Значение воды в процессе уплотнения грунта невозможно переоценить. Физические свойства каждого типа грунта определяются тем, как этот грунт реагирует на содержание влаги. Для каждого грунта существует значение влажности, при котором технологические свойства грунта достигают максимума при данной энергии уплотнения. В большинстве случаев чем меньше размер частиц, тем большее влияние вода оказывает на уплотнение.

Если влажность грунта слишком мала, с ним будет трудно работать, поскольку частицам будет не хватать смазки для перемещения в более плотное состояние. Кроме того, частицам будет не хватать связности для того, чтобы оставаться в положении, которое они заняли.

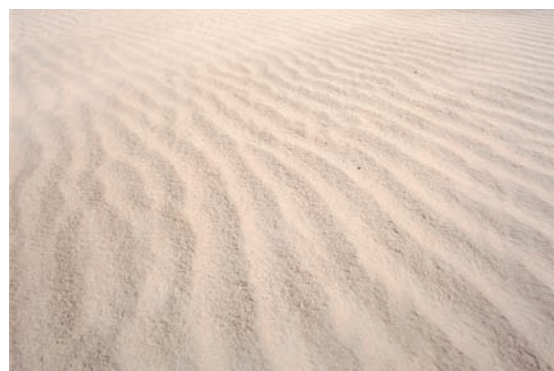
Вода добавляется для повышения взаимного сцепления частиц грунта и смазывающего эффекта. Добавление слишком большого количества воды может привести к насыщению.



При насыщении грунта пустоты заполняются водой, ослабляя несущую способность сооружения. Кроме того, частицы будут иметь избыточную смазку, придающую им избыточную подвижность.

Простым примером влияния воды на технологические свойства материала может служить строительство замков из песка на пляже. Благодаря воде песок приобретает достаточную связность, и это позволяет строить из него замки с толстыми стенами и высокими башнями. Однако невозможно представить себе постройку того же замка из песка в пустыне. Песок в пустыне, не содержащий воды, не обладает связностью, поэтому из такого песка в лучшем случае можно изготовить несколько невысоких песчаных дюн.

Вода влияет и на другие свойства материалов. Поскольку вода не сжимается, она будет вытеснять грунт, нарушая устойчивость. При замерзании вода расширяется и способна вспучивать окружающий грунт. При таянии вода уменьшается в объеме и создает условия для осадки грунта.

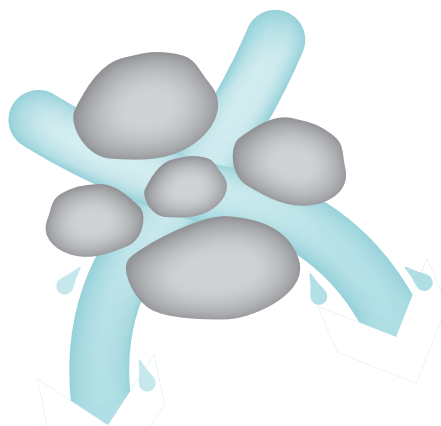


## ОСНОВЫ

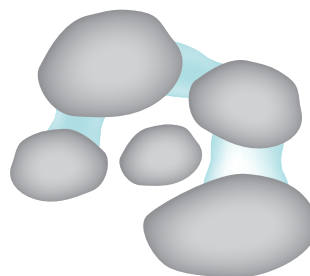
Вода присутствует во всех грунтах в их природном состоянии. Она появляется одним из трех способов.

1. Гравитационная вода свободно просачивается вниз под действием силы тяжести. Возможно ее естественное истечение из грунта.
2. Капиллярная вода удерживается в грунте небольшими порами или пустотами. Это так называемая свободная вода, которая может быть удалена только за счет понижения уровня грунтовых вод или за счет испарения.
3. Гигроскопическая вода остается в грунте после удаления гравитационной воды и капиллярной воды. Отдельные зерна грунта удерживают эту воду в виде очень тонкой пленки, имеющей физическое и химическое сродство с зернами грунта. Такую влажность называют гигроскопической. Для того чтобы определить истинный сухой вес грунта, следует просушить его в печи и удалить эту воду.

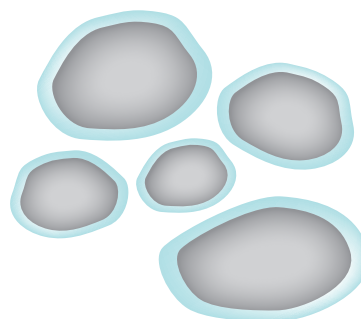
Слишком большое количество воды создает избыточный смазывающий эффект, лишая частицы устойчивости. С другой стороны, слишком малое количество воды снижает связность и затрудняет переориентацию частиц при переходе в более плотное состояние. Для каждого типа грунта имеется идеальная влажность, при которой можно достичь максимальной плотности при данной энергии уплотнения. Метод испытания по Проктору был разработан как средство, помогающее определить такую оптимальную влажность для выбранного усилия уплотнения.



**Гравитационная вода**



**Капиллярная вода**



**Гигроскопическая вода**



**[ИСПЫТАНИЕ ПО ПРОКТОРУ]**

Значение уплотнения грунта, образующего верхний и нижний слои основания, долгое время недооценивалось. Так было до 1933 г., когда Ральфом Р. Проктором, сотрудником Бюро водопроводных сооружений Лос-Анджелеса, был разработан ставший затем стандартом метод определения оптимальной влажности и соответствующей максимальной плотности скелета грунта (плотности грунта в сухом состоянии). В испытании по Проктору грунт с помощью ручной трамбовки уплотняют тремя слоями в стакане.

Стандартное испытание определяет оптимальную влажность материала, позволяющую при данном усилии уплотнения получить максимальную плотность сухого грунта. Этот результат используется для разработки технического задания для уплотнения на рабочем объекте. Поскольку нельзя ставить знак равенства между реальными условиями строительства и идеальными условиями в лаборатории, в проекте задается степень уплотнения, величина которой несколько ниже плотности сухого грунта, определенной в лаборатории. Проектная плотность может составлять 90–100 процентов от лабораторной.

Появление сооружений, требующих повышения несущей способности до уровня, позволяющего выдерживать исключительно высокие нагрузки, или ограничения осадки, послужило причиной введения модифицированных испытаний по уплотнению. При модифицированном



*Комплект инструментов для лабораторных испытаний по Проктору*

испытании по уплотнению расходуется приблизительно в четыре раза больше энергии, чем при стандартном испытании по уплотнению, и результаты обычно дают более низкую «оптимальную» влажность.

**Превышение 100-процентной плотности сухого грунта**

Как может проектная плотность превысить 100 процентов? Максимальная плотность сухого грунта, определяемая при испытании по Проктору, не является максимально достижимой в реальных условиях плотностью для данного конкретного грунта. 100-процентная плотность сухого грунта по Проктору соответствует максимальной плотности, достигнутой в лабораторных условиях для отдельного образца при использовании определенного усилия уплотнения и идеальной влажности. При стандартном и модифицированном испытаниях по Проктору используются трамбовки различного веса и достигается различная плотность сухого грунта для одного и того же образца грунта. В реальных условиях функцию трамбовки выполняет огромный каток для уплотнения грунта, создаваемое им усилие отличается от усилия трамбовки в испытании по Проктору. Поэтому нет ничего необычного в достижении в реальных условиях плотности, составляющей 100–115 процентов максимальной плотности сухого грунта по Проктору. Инженеры-геотехнологи на основании требований к несущей способности и характеристик грунта могут гарантировать, что плотность после уплотнения превысит 100 процентов плотности по Проктору.

## ОСНОВЫ

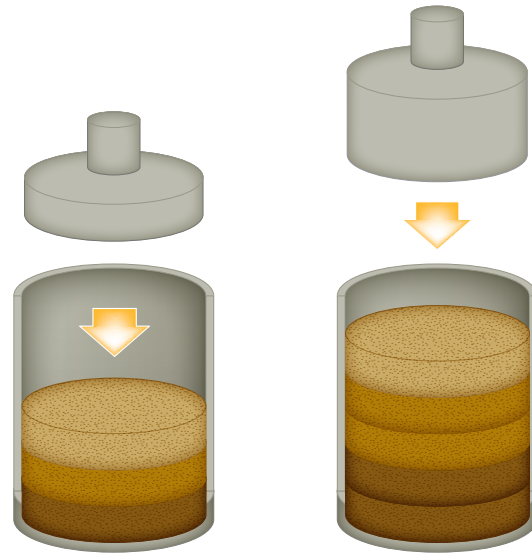
Стандартное или модифицированное испытание по Проктору повторяют пять раз на одном образце грунта. Порядок выполнения остается прежним, но влажность каждый раз изменяется.

Серия испытаний начинается, когда грунт имеет влажное состояние, но влажность заведомо ниже предполагаемой оптимальной влажности. После уплотнения первого образца в цилиндрическом стакане измеряется вес грунта во влажном состоянии и часть образца помещается в сушильную печь. После полного высушивания образца он взвешивается вновь. Разность веса во влажном и сухом состоянии позволяет определить влажность, которая выражается в процентах от веса сухого грунта.

Затем осуществляется уплотнение второго образца с более высокой влажностью, и процесс взвешивания и высушивания повторяется. Дальнейшие испытания образцов с наращиванием влажности продолжаются до прекращения увеличения плотности во влажном состоянии или до достижения грунтом слишком влажного состояния, при котором с ним невозможно работать.

По значениям плотности сухого грунта и влажности для каждого образца строится график. Точка верхнего экстремума этого графика определяет максимальную плотность грунта в сухом состоянии и оптимальную влажность для этого образца грунта.

## ИСПЫТАНИЯ ПО ПРОКТОРУ



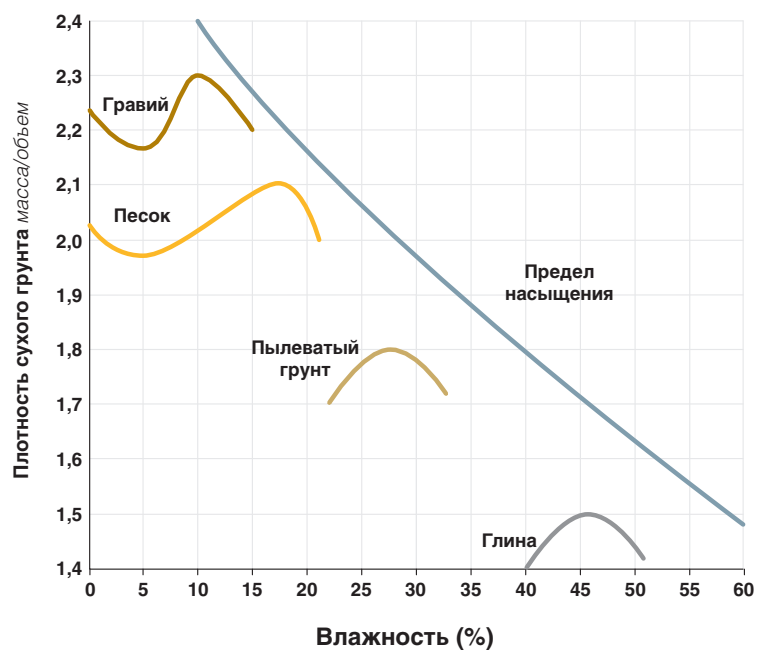
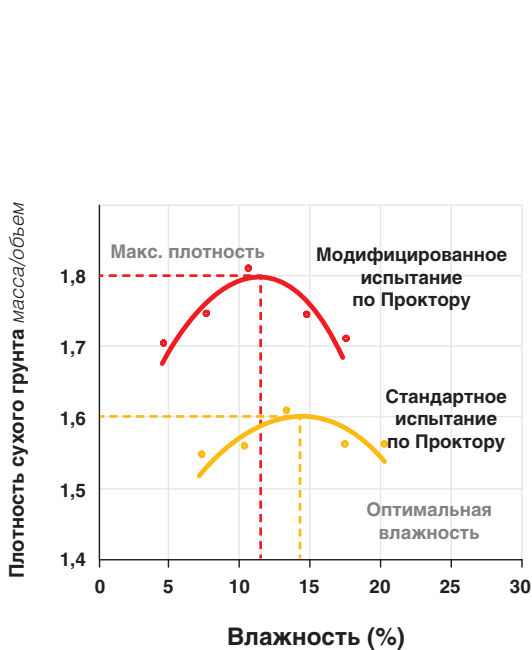
**Стандартное**

25 ударов по каждому слою трамбовкой массой 2,5 кг (5,5 фунта), сбрасываемой с высоты 305 мм (12 дюймов)

**Модифицированное**

25 ударов по каждому слою трамбовкой массой 4,5 кг (10 фунтов), сбрасываемой с высоты 457 мм (18 дюймов)

## ГРАФИКИ ПРОКТОРА



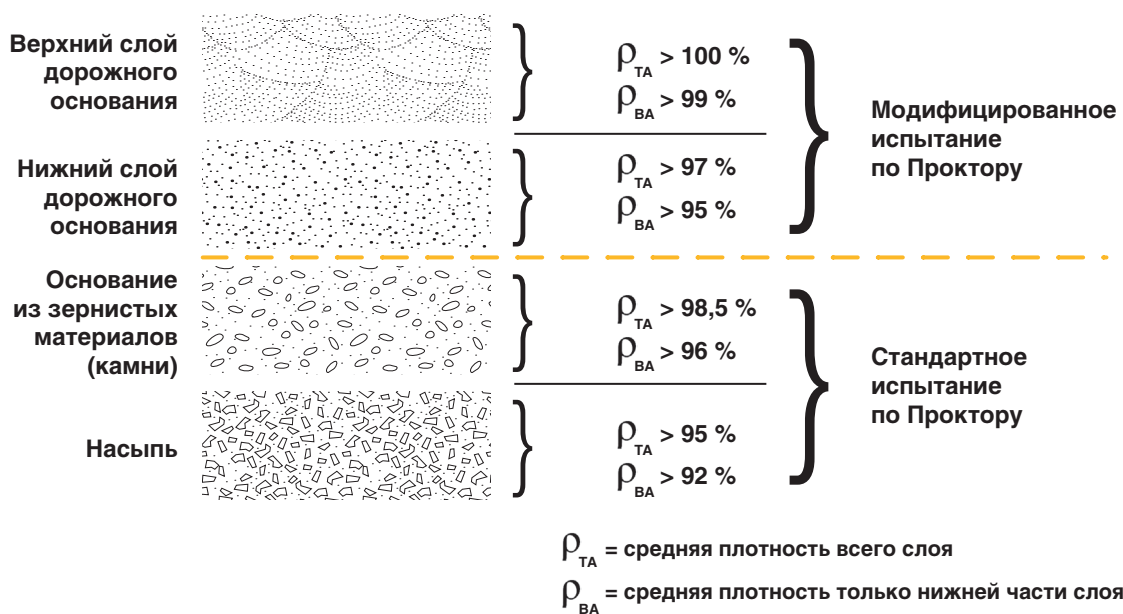


При лабораторных испытаниях определяется влажность, при которой может быть достигнута максимальная плотность данного грунта. Проектная плотность в реальных условиях строительства задается в процентах относительно максимальной лабораторной плотности сухого грунта. В большинстве случаев такая проектная плотность составляет 95 процентов плотности, определенной

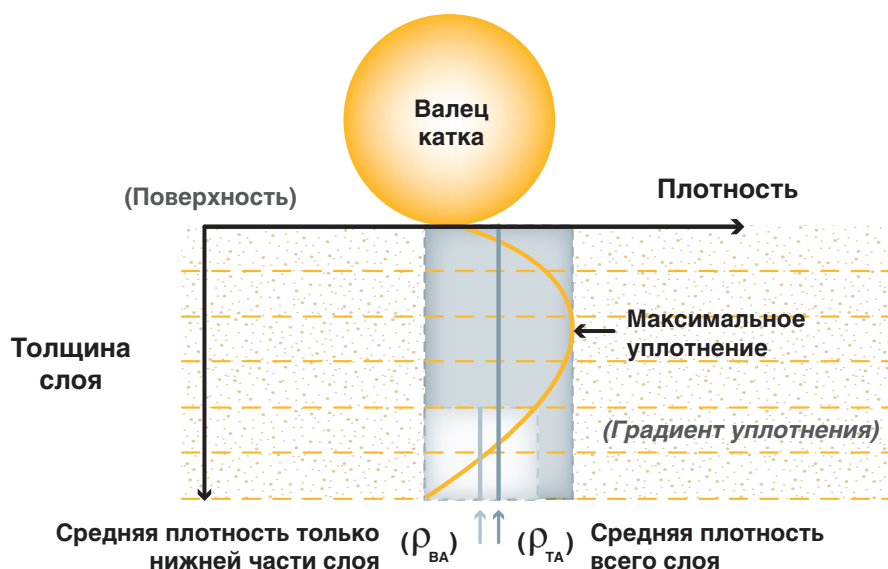
методом стандартного испытания по Проктору, для насыпей и достигает 100 процентов плотности, определенной методом модифицированного испытания по Проктору, для дорожных сооружений. Аналогичным образом значение влажности должно находиться в установленных пределах относительно оптимальной влажности, определенной в лаборатории.

**ПРОЕКТНАЯ ПЛОТНОСТЬ**

Этот пример показывает, что чем ближе материал к поверхности, тем выше его плотность.



Эта иллюстрация изменения степени уплотнения позволяет сравнить среднюю плотность всего слоя ( $\rho_{ТА}$ ) со средней плотностью только нижней части слоя ( $\rho_{ВА}$ ).



## [СВОЙСТВА ГРУНТА]

При определении характеристик и свойств различных грунтов инженеры пользуются специфическими терминами. Для лучшего понимания принципов и технологий уплотнения грунта необходимо владеть данными терминами.

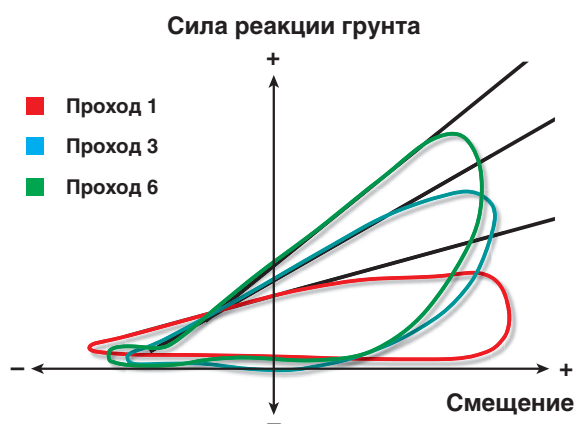
**Несущая способность** – это важнейшее свойство дорожных сооружений. Говоря простым языком, это способность сооружения выдерживать нагрузку, которую оно несет. Оценка несущей способности обычно осуществляется пробной укаткой груженым самосвалом с осмотром образующейся колеи или путем проведения испытаний с использованием штампов опытного нагружения. В дорожном строительстве с целью обеспечения соответствия несущей способности проектным требованиям обычно используются другие свойства, такие как модуль деформации, жесткость и плотность.

**Жесткость** – это способность материала сопротивляться прогибу под нагрузкой. Она вычисляется как частное от деления напряжения на смещение. В отличие от модуля упругости, жесткость не характеризует грунт как собственно материал. Жесткость – это свойство, определяемое количеством, формой и составом грунта и характеризующее то, насколько будет прогибаться грунт такой формы под нагрузкой. По этой причине жесткость была признана важным показателем для оценки несущей способности грунта.

**Плотность** – это частное от деления массы материала на занимаемый им объем. Максимальная плотность определяет минимальный объем, который может занимать материал данной массы. В этом состоянии материал будет лишен пустот, представляя собой сплошной массив. Плотность грунтов повышают путем уплотнения, делая их объем меньше. Традиционно плотность была стандартным показателем, по которому инженеры оценивали несущую способность; однако, поскольку высокая плотность не связана с прогибом и может становиться причиной разрушения или деградации некоторых материалов, роль плотности как основного показателя оценки несущей способности уменьшилась. Тем не менее, она все еще остается необходимым и надежным показателем при принятии определенных допущений в отношении несущей способности дороги.

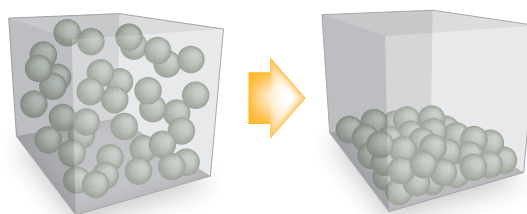


## ЖЕСТКОСТЬ

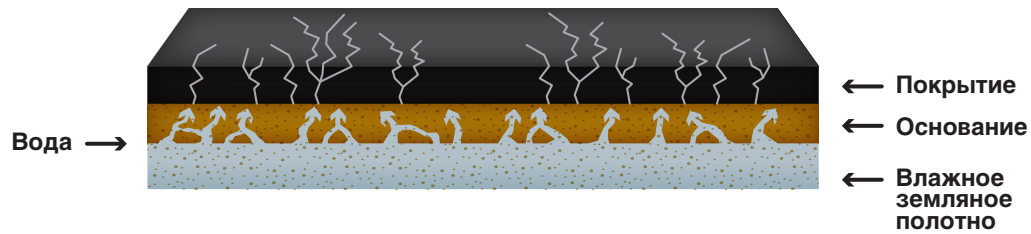


Чем больше наклон графика, тем больше жесткость грунта.

## ПЛОТНОСТЬ



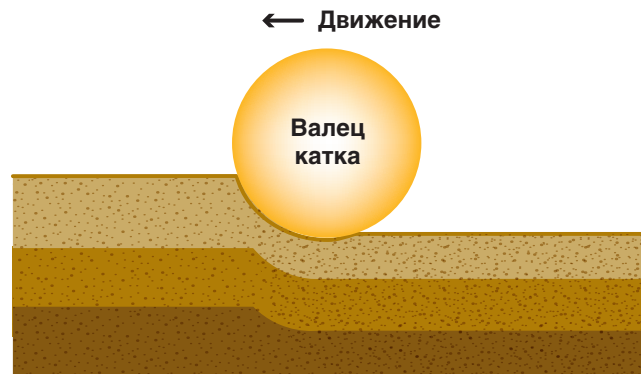
**КАПИЛЛЯРНОСТЬ**



**Капиллярность** – это способность грунта перемещать воду вверх или в горизонтальном направлении. Желательно, чтобы основание, используемое в качестве слоя между земляным полотном и дорожным покрытием, действовало как барьер капиллярной воды, препятствующий движению капиллярной воды вверх от земляного полотна. Основание из зернистых материалов также обеспечивает слив воды от земляного полотна. Капиллярная вода удерживается в мелких порах или пустотах

в грунте. Это так называемая свободная вода, но удалить ее можно только за счет понижения уровня грунтовых вод, длительного тяжелого нагружения или испарения. Если основание не формирует капиллярного барьера, не находящая выхода вода будет размягчать и расширять земляное полотно, вызывая снижение несущей способности и преждевременное разрушение дорожного полотна.

**СЖИМАЕМОСТЬ**



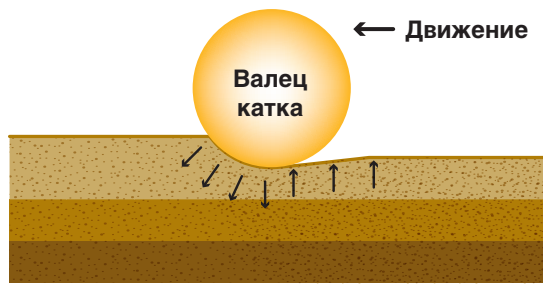
**Сжимаемость** – это скорость уменьшения объема грунта под действием приложенного к нему усилия. Грунты с высокой сжимаемостью состоят из частиц, которые легко изменяют положение, за счет чего уменьшается объем пустот, занимаемых воздухом или водой. В условиях высокой влажности глинистые грунты, как правило, обладают лучшей

сжимаемостью, чем зернистые грунты. Но они имеют меньшую водопроницаемость, что делает процесс отвода воды и сжатия глинистых грунтов очень медленным. В условиях быстрого воздействия нагрузок, например нагрузок от колес движущегося транспорта, давление воды в мелкозернистых грунтах возрастает, вызывая повышение сжимаемости.

## ОСНОВЫ

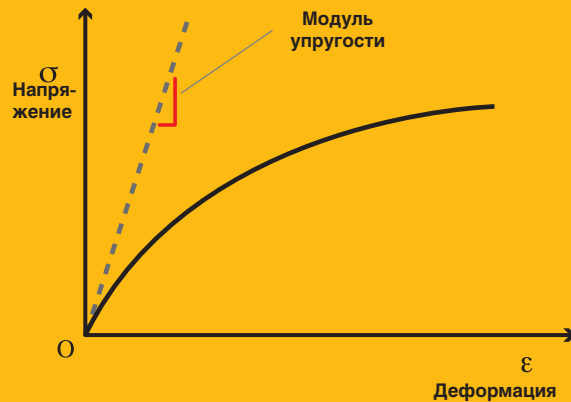
**Упругость** – это способность материала возвращаться в первоначальную или близкую к первоначальной форму после прекращения действия сжимающей нагрузки. Упругость может являться полезным свойством грунта, позволяя выдерживать переменные нагрузки без накопления необратимой деформации. Однако дороги, основание или земляное полотно которых обладает высокой эластичностью, могут разрушаться, если модуль упругости слишком низок, что приводит к высоким напряжениям внутри слоев покрытия. Для регулирования упругости грунтов и оснований часто применяется химическая и механическая стабилизация. Органические грунты имеют очень высокую упругость, но низкий модуль упругости.

### УПРУГОСТЬ

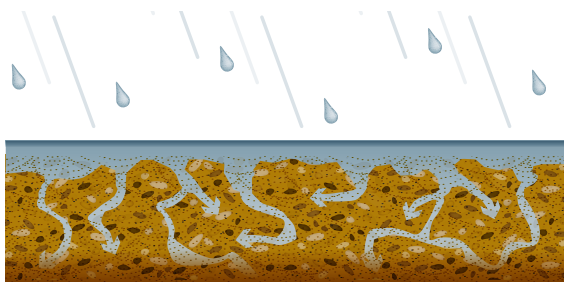


### Модуль упругости:

Это величина, определяемая отношением воздействующего напряжения к вызываемой деформации грунта. Модуль упругости определяется при испытаниях образцов грунта и может изменяться в зависимости от состава грунта. Этот модуль часто используется в качестве показателя, характеризующего несущую способность грунта. Толщина слоя покрытия обычно рассчитывается на основе модуля упругости лежащих ниже слоев.



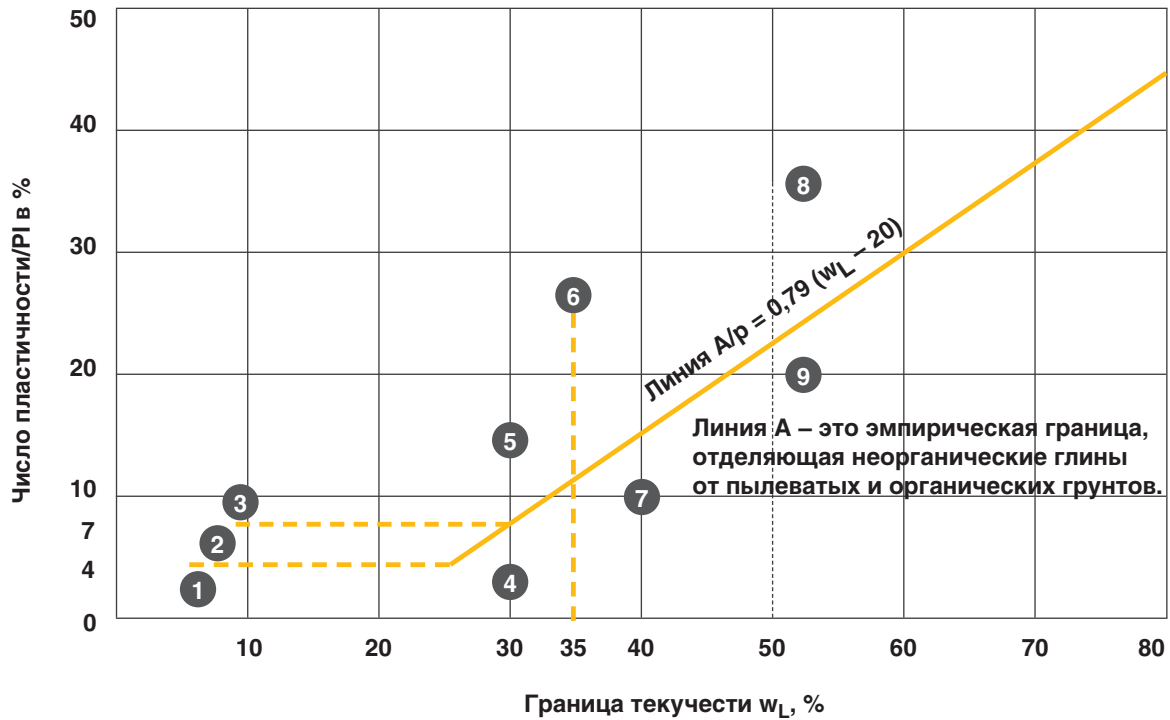
### ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ



**Водопроницаемость** – это способность грунта пропускать воду. Водопроницаемость отличается от капиллярности и заключается в способности грунта впитывать воду. На водопроницаемость грунта влияют механический состав грунта, его гранулометрический состав, а также степень уплотнения. Водопроницаемость – это наиболее

значительно меняющийся параметр грунта, размах колебаний которого может превышать 10 порядков. Как правило, крупнозернистые грунты отличаются более высокой водопроницаемостью, чем мелкозернистые, поскольку первые имеют пустоты большего объема между частицами.

## ПЛАСТИЧНОСТЬ



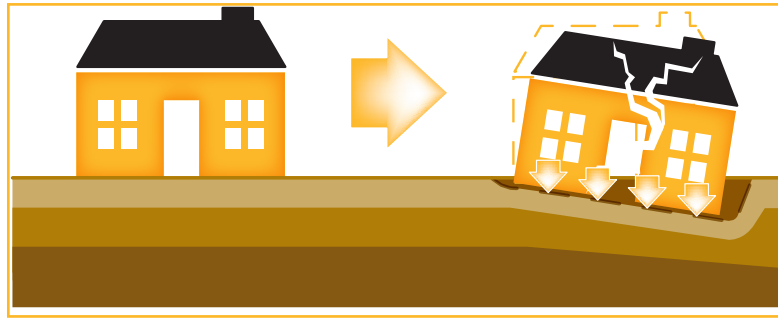
- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| 1 Песчанопылеватые смеси          | 6 Глины со средней пластичностью  |
| 2 Промежуточный диапазон          | 7 Пылеватые грунты с органическими примесями, органогенные пылеватые грунты и пылеватые грунты со средней пластичностью |
| 3 Песчаноглинистые смеси          | 8 Глина с сильно выраженной пластичностью   |
| 4 Тугопластичные пылеватые грунты | 9 Глины с органическими примесями и явно сжимаемые пылеватые грунты   |
| 5 Тугопластичные глины            |   |

**Пластичность** характеризует степень связности и деформируемости грунта. Для измерения пластичности материалов применяется число пластичности (PI). Многие глинистые грунты обладают высоким числом пластичности PI,

довольно легко подвергаются сжатию и имеют высокий уровень связности. Грунт с нулевым числом пластичности является несвязным или непластичным. Влажность грунта также влияет на число пластичности.

# ОСНОВЫ

## ОСАДКА

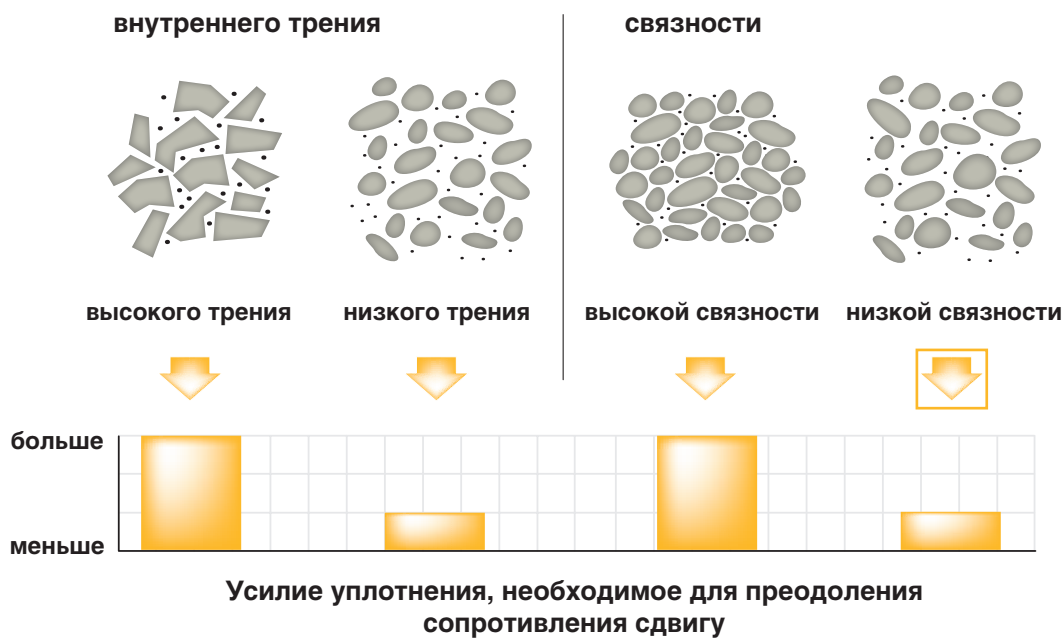


Осадка

**Осадка** – это процесс перемещения вниз поверхности грунта в результате консолидации материала, из которого состоит грунт. Осадка часто бывает следствием недостаточно качественного уплотнения. Частицы недостаточно уплотненного грунта с течением

времени естественным образом меняют положение и сокращают, таким образом, объем пустот, которые занимает воздух или вода. В результате возникает осадка, напрямую связанная с уменьшением объема пустот.

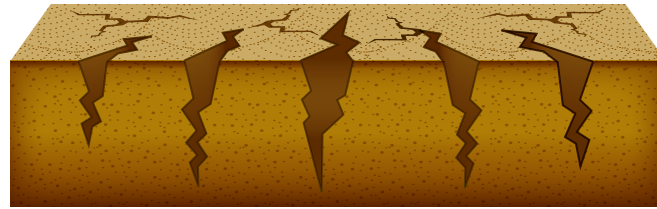
## СОПРОТИВЛЕНИЕ СДВИГУ ЗАВИСИТ ОТ...



**Сопротивление сдвигу** – это сопротивление частиц грунта скольжению относительно друг друга при воздействии усилия, например вибрации или усилия уплотнения. Сопротивление сдвигу возникает в грунте в результате внутреннего трения (сопротивление частиц взаимному смещению), а также

из-за связности (взаимное притяжение частиц). Частицы неправильной формы вызывают большее сопротивление сдвигу, чем частицы, имеющие сглаженную форму. Чем выше сопротивление сдвигу у грунта, тем большее уплотняющее усилие необходимо создать для достижения требуемой плотности грунта.

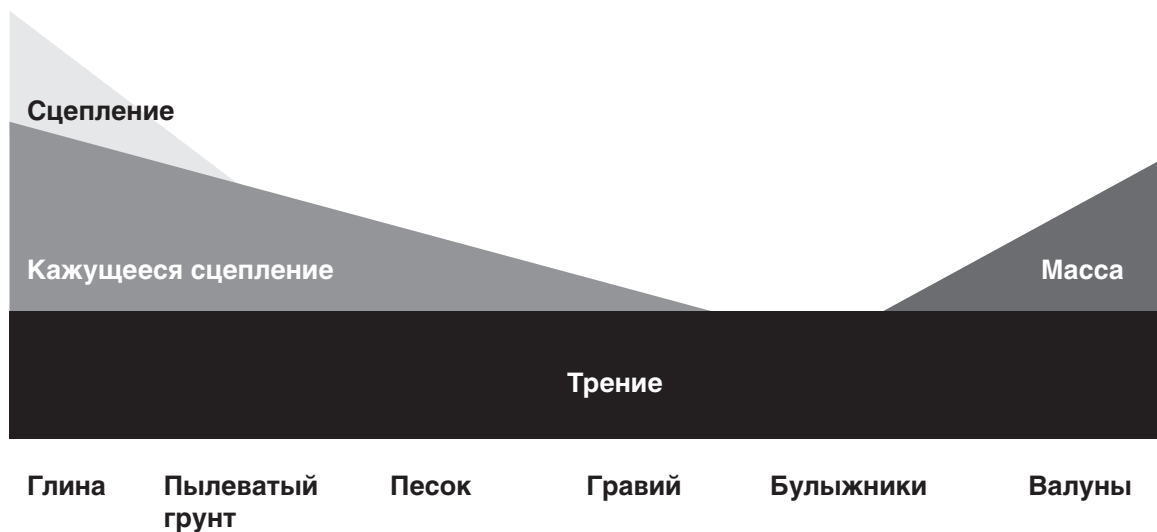
**УСЫХАНИЕ**



**Видимое усыхание или набухание** – признак того, что грунт является мелкозернистым (например, глиной). Цикл усыхания и набухания связан с выделением и накоплением влаги в грунте. Грунт такого типа плохо подходит

для использования в качестве основания, поскольку постоянные изменения его объема могут привести к разрушению элементов конструкции зданий или дорожных покрытий, требующих стабильной опоры.

**УПЛОТНЯЕМОСТЬ**



**Уплотняемость:** в процессе перехода грунта из рыхлого в плотное состояние легкость или скорость уплотнения часто называют уплотняемостью. Уплотняемость можно определить как отношение разности конечной и начальной плотностей к начальной плотности. Чем выше уплотняемость, тем легче или быстрее изменяется плотность под воздействием уплотнения. Факторы, влияющие на уплотняемость, включают

гранулометрический состав грунта (грунт с хорошо подобранным гранулометрическим составом имеет более высокую уплотняемость, чем грунт с прерывистым гранулометрическим составом), влажность, сопротивление сдвигу (деформации), энергию и метод уплотнения. Понимание факторов, повышающих уплотняемость, помогает делать правильный выбор оборудования и технологий уплотнения.

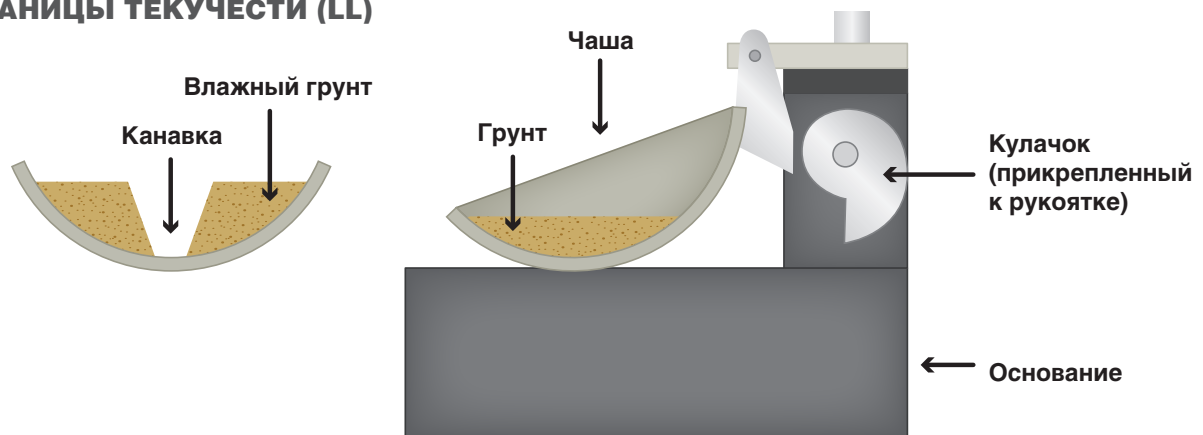
### [ ГРАНИЦЫ КОНСИСТЕНЦИИ ]

Степень влияния влажности на уплотняемость связных (глинистых) грунтов можно лучше всего понять путем изучения границ консистенции грунта.

Шведским химиком Альбертом Аттербергом были впервые разработаны определенные

границы консистенции грунтов: граница текучести, граница пластичности, число пластичности и граница усадки. Иногда под границами Аттерберга подразумевается основа для дифференциации легкопластичных, тугопластичных и непластичных материалов.

### ИСПЫТАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦЫ ТЕКУЧЕСТИ (LL)



Простое испытательное устройство для определения границы текучести

#### Граница текучести (LL)

Влажность, при которой грунт переходит из пластичного состояния в текучее, называется границей текучести. Это означает, что влажность грунта достаточна для преодоления внутреннего трения и сцепления частиц грунта.

Для определения границы текучести применяется простое испытание. Берется образец влажного грунта и помещается в небольшую чашу, где верхняя поверхность пробы чем-нибудь выравняется. В образце делают глубокую канавку и по дну чаши наносят 10–30 ударов, наблюдая при этом за канавкой. Если расстояние между стенками канавки остается неизменным, образец грунта извлекается, в него добавляется вода и процесс повторяется. Если стенки канавки сближаются и между ними остается 15 мм ( ), это означает, что образец переходит в жидкое состояние и достиг границы текучести.

Высоким значениям границы текучести соответствует высокая сжимаемость грунта. Обычно глины имеют высокие значения границы текучести; песчаные грунты имеют низкие значения границы текучести.

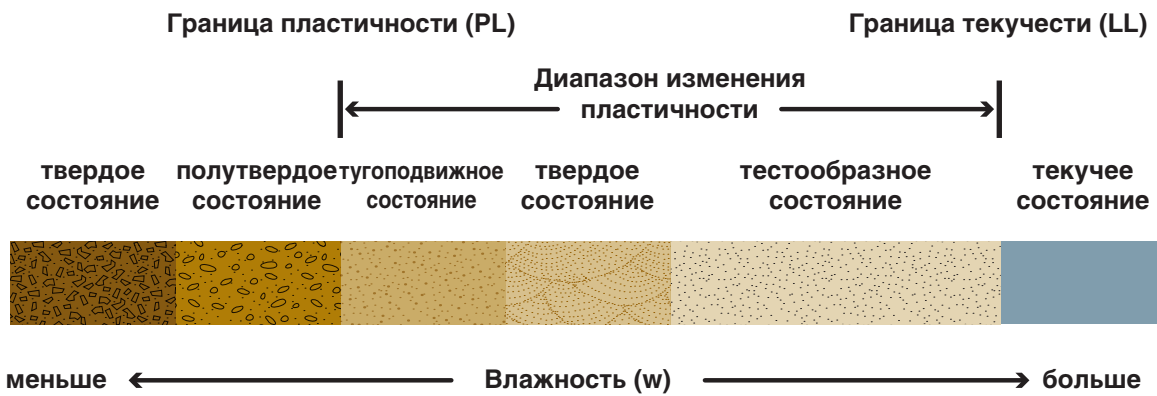
#### Граница пластичности (PL)

Граница пластичности соответствует состоянию, когда грунт переходит из полутвердого в пластичное состояние. Это происходит, когда грунт содержит ровно столько влаги, чтобы небольшое его количество можно было раскатать в шнур диаметром приблизительно 3 мм ( $\frac{1}{8}$ ") без распада на куски.

Граница пластичности грунта имеет важное значение, поскольку она определяет ту влажность, при которой частицы скользят относительно друг друга, но при этом все еще сохраняют существенное взаимное сцепление. Именно при такой влажности уплотнение грунтов с высоким содержанием глины осуществляется наиболее эффективно. При превышении влажностью границы пластичности прочность грунта быстро понижается.



**ЧИСЛО ПЛАСТИЧНОСТИ (PI)**



**Число пластичности (PI)**

Эта величина определяется как разность между границей пластичности и границей текучести грунта. Грунты, характеризующиеся высоким числом пластичности, хорошо сжимаются и обладают высокой связностью. Грунт почти или совсем лишен связности, когда значение влажности соответствует границе текучести, и обладает значительной связностью, когда значение влажности соответствует границе пластичности. Таким образом, число пластичности служит средством оценки сжимаемости и связности грунта.

Число пластичности также связано с водопроницаемостью. Чем выше число пластичности, тем ниже водопроницаемость. И, наоборот, чем ниже число пластичности, тем водопроницаемость выше. Для многих строительных работ с использованием грунтов с высоким содержанием глины в проектную техническую документацию закладываются требования определенного гранулометрического состава, максимальной границы текучести и максимального числа пластичности.

**Граница усадки (SL)**

При уменьшении влажности грунта до значения ниже границы пластичности он дает усадку и становится хрупким. Граница усадки определяется как влажность, при которой объем образца грунта перестает изменяться. Граница усадки является оптимальной влажностью для уплотнения многих непластичных (песчаных) грунтов. Грунты, содержащие достаточно глины для повышения числа пластичности, лучше всего уплотнять при промежуточной влажности между границей усадки и границей пластичности.



## Раздел 2

# ТИПЫ И СИСТЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ ГРУНТОВ

Наилучшим способом определения типа грунта, которого следует по возможности придерживаться, являются лабораторные испытания. При отсутствии такой возможности можно провести одно или несколько испытаний в полевых условиях, чтобы идентифицировать грунт и определиться с технологией уплотнения.



# ТИПЫ

## [СИСТЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ ГРУНТОВ]

В настоящее время в мире используется несколько различных систем классификации грунтов. Во всех системах употребляются термины гравий, песок, пылеватый грунт и глина, но буквенные обозначения и числовые

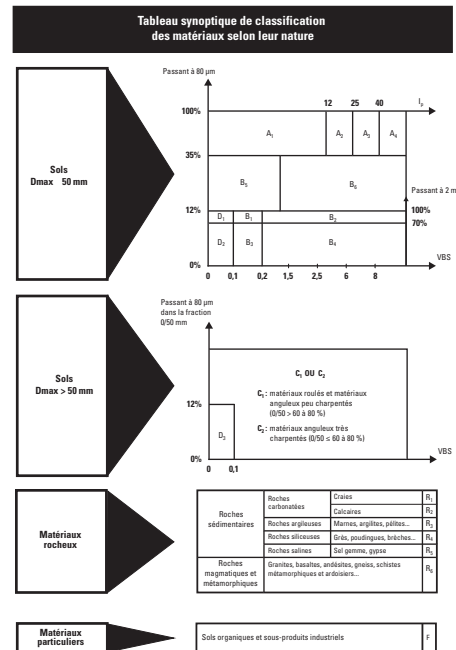
значения могут несколько отличаться. Системы классификации грунтов предназначены для создания стандартов, посредством которых можно идентифицировать грунты и их технологические свойства.

**Система классификации грунтов AASHTO** – широко используемая система классификации грунтов Американской ассоциации служащих государственных автомобильных дорог и транспорта (AASHTO), основанная на поведении грунтов, используемых при строительстве автомагистралей. В рамках данной системы выделяется семь основных групп материалов с некоторыми подгруппами. Группы объединены в две основные категории: зернистые материалы и пылевато-глинистые материалы.

AASHTO CLASSIFICATION OF HIGHWAY SUBGRADE MATERIALS (with suggested subgroups)												
General Classification	Granular Materials (35% or less passing #200)							Silty-Clay Materials (more than 35% passing #200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
Group Classification	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Sieve Analysis Percent Passing:	#10 #40 #200	0-50 0-30 0-15	0-50 0-25 0-10	51-100 0-35	0-35	0-35	0-35	38-100	38-100	38-100	38-100	38-100
Characteristics of Fraction Passing #60:				0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+	41+
Liquid Limit				0-10	11+	0-10	11+	0-10	11+	0-10	11+	11+
Plasticity Index	0-6		N.P.	0		0-4		0-8	0-12	0-16	0-20	
Group Index	0		0			0-4		0-8	0-12	0-16	0-20	
Usual Types of Significant Constituent Materials	Stone Fragments Gravel and Sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand				Silty Soils		Clayey Soils		
General Rating as Subgrade	Excellent to Good							Fair to Poor				

Полные таблицы для всех размеров приведены в Приложении.

**Французская система классификации грунтов:** эта система делит материалы на классы и подклассы на основе механического анализа свойств, включая гранулометрический состав, пластичность и эквивалент песка.





### [КЛАССИФИКАЦИЯ ГРУНТОВ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ]

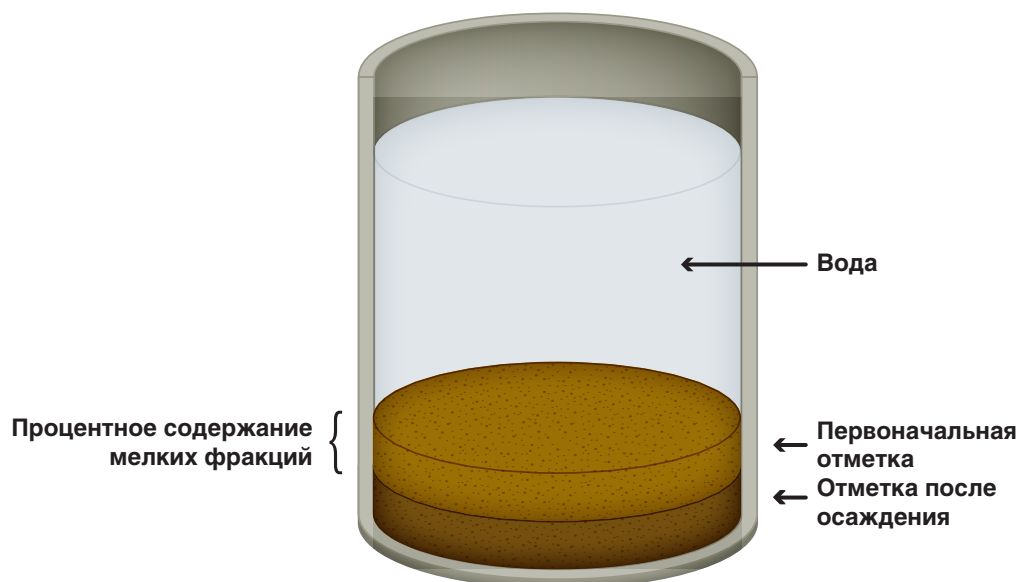
Для использования систем классификации нужны лабораторные исследования, такие как ситовый анализ или испытание для определения числа пластичности. Однако, когда воспользоваться услугами лаборатории нет возможности, можно использовать некоторые

**Гранулометрический состав/распределение частиц по размерам:** для того чтобы выяснить гранулометрический состав сухого грунта, отсыпьте пробу грунта на ровную поверхность. Используя кусок плотной бумаги или картона как грабли, отделите более крупные частицы грунта. Вычислите процентное содержание частиц крупнее 5 мм (3/16") и процентное содержание мелких фракций (частиц, слишком мелких, чтобы видеть их по отдельности невооруженным глазом). Также определите, имеют ли крупные частицы однородный размер (плохо подобранный гранулометрический состав) или среди них есть частицы крупного, среднего и малого размеров (хорошо подобранный гранулометрический состав).

Если грунт мокрый, измельчите ком такого грунта карандашом и оцените процентное содержание методом, который применяется для сухого грунта. Для того чтобы определить процентное содержание мелких фракций, налейте в прозрачный стакан воды на 3 мм (1/8"). Затем заполните стакан грунтом на 1/4. Долейте такое количество воды, чтобы она слегка покрывала грунт.

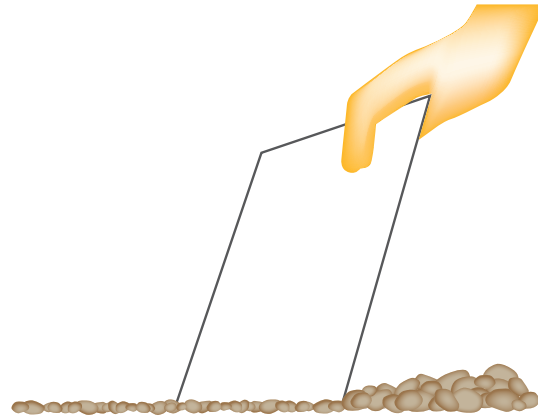
Отметьте этот уровень резиновой лентой. Заполните стакан водой на 3/4 и энергично взболтайте смесь. Подождите полторы минуты и отметьте высоту осевшего грунта. Разность между двумя отметками определяет процентное содержание мелких фракций.

### ПРОЦЕНТНОЕ СОДЕРЖАНИЕ МЕЛКИХ ФРАКЦИЙ



простые полевые испытания для того, чтобы определить различные грунты. Такие испытания позволяют определить гранулометрический состав, пластичность и содержание основных материалов в грунте.

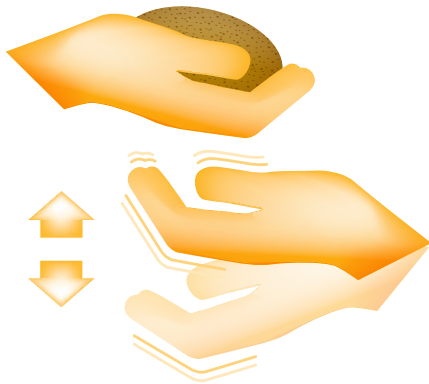
### ИСПЫТАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА



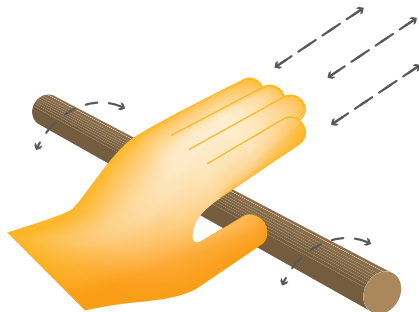
**Пластичность мелкозернистого грунта:**

в полевых условиях можно выполнить одно или более испытаний для оценки пластичности грунта.

**ИСПЫТАНИЕ ВСТРЯХИВАНИЕМ**



**ИСПЫТАНИЕ НА ВЯЗКОСТЬ**



**РУЧНОЕ ИСПЫТАНИЕ**



- **Испытание встряхиванием:** возьмите комок мелкозернистого грунта и хорошо разомните его, чтобы удалить как можно больше крупных частиц. Постепенно добавляйте воду и продолжайте разминать грунт, пока он не станет клейким. Держа шарик грунта в ладони одной руки, постучите по тыльной части этой ладони пальцами другой руки. Если поверхность шарика грунта заблестит и станет мокрой, это значит, что грунт преимущественно состоит из мелкого песка или пылеватого грунта. Глина при такой проверке почти или совсем не дает никакой реакции, просто оставаясь грязной.
- **Испытание на вязкость:** отберите примерно половину шарика грунта и разомните его между большим и указательным пальцами, чтобы сделать сухим. После этого попробуйте раскатать эту пробу грунта в шнур. Если сформировать шнур вообще не удастся, это означает, что грунт определенно представляет собой пылеватый грунт или мелкий песок. Для высыхания высокопластичного грунта требуется длительное время. Такой грунт становится твердым и похожим на воск. Для его раскатывания требуется значительное давление, и шнур начинает разрушаться только после достижения диаметра 3 мм (1/8 дюйма).
- **Испытание на прочность после высушивания:** возьмите другую половину шарика грунта и слепите из него шарик. Отложите его в сторону и оставьте сохнуть на воздухе. Когда грунт высохнет, раздавите его и выберите неровный, остроконечный фрагмент. Попробуйте раздавить этот фрагмент между большим и указательным пальцами. Пылеватый грунт превращается в порошок при небольшом усилии. Глина похожа на камень, и ее почти невозможно раздавить между пальцами.
- **Мытье рук:** после работы с пылеватым грунтом и песком на пальцах ощущается пыль, и, потерев пальцы друг о друга, их можно почти полностью очистить. Небольшая струя воды из крана смывает грунт. После работы с глиной на пальцах образуется корка, которую нельзя удалить трением в сухом состоянии. Вода не смывает корку. Для очистки рук их необходимо потереть друг о друга под струей воды.
- **Ручное испытание:** наберите полную горсть грунта. Сожмите грунт в ладони и раскройте ладонь. Если грунт рассыпается и не сохраняет форму, полученную при сжатии в ладони, он слишком сухой. Если он рассыпается при падении, он слишком сухой. Если грунт принимает форму и при падении разрушается только на несколько кусков, его влажность оптимальна для уплотнения. Если грунт пластичен в вашей ладони, оставляет влагу на пальцах и при падении не распадается на куски, сохраняя целостность, он имеет слишком

## ТИПЫ

- **Отмучивание:** помимо описанных выше испытаний в полевых условиях, можно использовать отмучивание для определения процентного содержания частиц грунта различных размеров и оценки пригодности грунта для уплотнения. Для проведения отмучивания потребуется лишь прозрачный стакан, вода и представительная проба грунта.

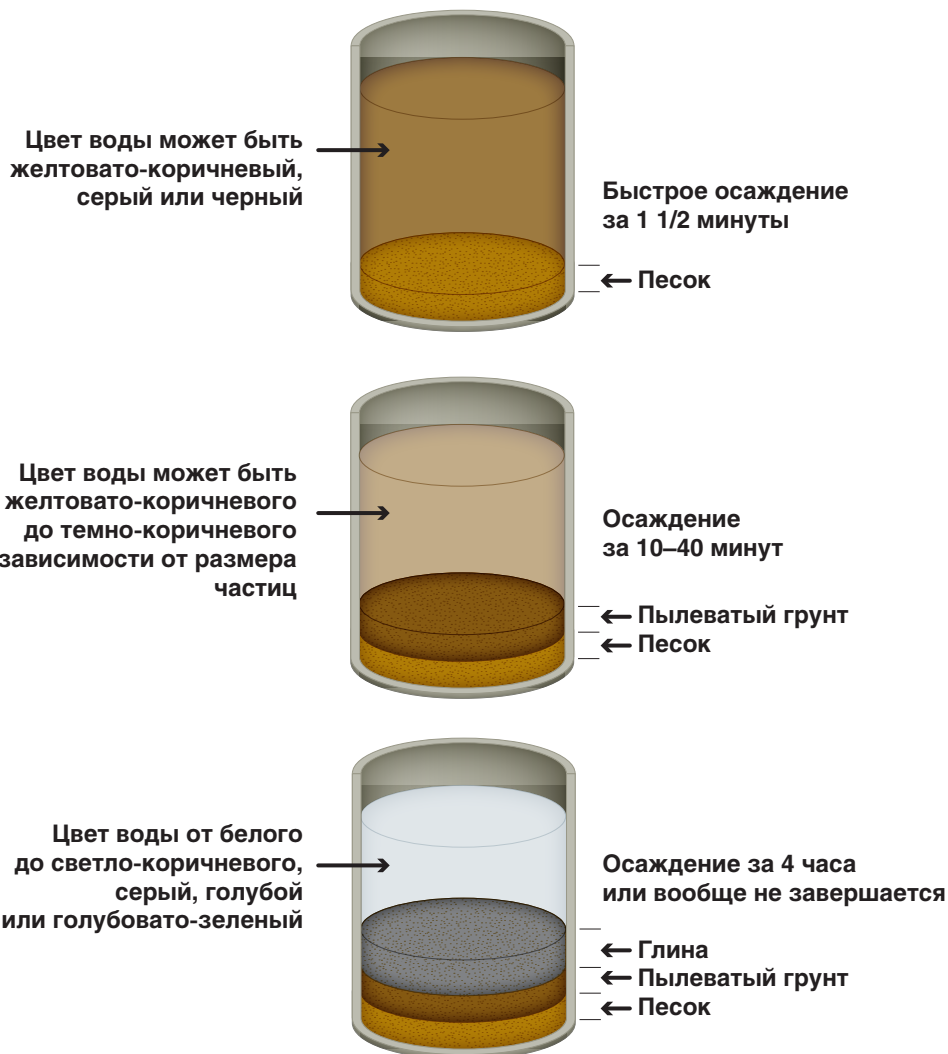
Заполните стакан на 1/4–1/3 материалом. Затем налейте в стакан воду до уровня на 15 мм (1/2 дюйма) ниже края. Хорошо взболтайте смесь и наблюдайте за процессом осаждения материала.

Осаждение материала будет происходить тремя разными слоями. В самом низу будет песок, выше – пылеватый грунт и на самом верху – глина. Помимо выявления различных групп, по результатам можно судить о плохом или хорошем гранулометрическом составе грунта. Хотя частицы пылеватого грунта и глины нельзя увидеть

невооруженным глазом, об изменениях размера частиц можно судить по изменению цвета. Кроме того, чем больше времени занимает осаждение, тем меньше частицы.

Отмучивание позволяет установить несколько фактов. Оно показывает основные материалы, из которых состоит грунт, и гранулометрический состав каждого из них, а время осаждения служит показателем крупности частиц. В большинстве случаев одинаковый размер частиц (плохо подобранный гранулометрический состав) и малый размер частиц свидетельствуют о меньшей устойчивости строительного материала, чем в случае, когда смесь имеет хорошо подобранный гранулометрический состав с присутствием частиц всех размеров. Эти материалы плохо поддаются уплотнению, поскольку зерна материала продолжают смещаться под машиной.

## ОТМУЧИВАНИЕ





**[ОБОБЩАЮЩИЕ ВЫВОДЫ ПО ИСПЫТАНИЯМ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ]**

Типы грунтов	Описание
<b>Глина</b>	Отсутствие реакции на испытание встряхиванием; неровный шнур, который медленно сохнет; остается с трудом удаляемая корка на руках.
<b>Пылеватые грунты</b>	Быстрая реакция на испытание встряхиванием; слабый или крошащийся шнур; легко стираемый или смываемый остаток в виде порошка на руках.
<b>Смеси пылеватого грунта и глины</b>	Промежуточные или противоречивые реакции на ручные испытания.
<b>Песок или гравий с тонкодисперсной глиной</b>	Глины достаточно для того, чтобы испачкать руки при разминании влажной пробы, но недостаточно для того, чтобы сформировать комок глины.
<b>Песок или гравий с пылеватым грунтом</b>	Любая смесь с пылеватыми или песчанистыми мелкими фракциями.
<b>Чистый песок и гравий</b>	Вода, добавляемая в такие грунты, сразу поглощается, не оставляя никакой грязи.
<b>Разрушенная взрывом или механическим воздействием порода</b>	Материал в виде кусков изрезанной формы, среди которых нет менее крупного материала для заполнения пустот.





## Раздел 3 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПЛОТНЕНИЯ

Понимание физических основ уплотнения различных типов грунта, эффективности применения различных машин и их уплотняющих возможностей является залогом соблюдения требований к плотности грунта наиболее экономичным способом.



## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

### [ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВИБРАЦИОННОЕ УПЛОТНЕНИЕ]

Вибрационное уплотнение грунта – это сложный процесс. На эффективность уплотнения влияет много различных факторов. Все факторы, оказывающие влияние на уплотнение, должны учитываться в совокупности, а не по отдельности. Степень эффективности уплотняющего воздействия определяется комбинированными характеристиками катка и грунта, на который он воздействует. Технические проектные условия определяют, является ли уплотняющее воздействие

достаточным. Факторы или характеристики, влияющие на вибрационное уплотнение, можно разделить на три категории:

1. Характеристики, связанные с материалом и условиями на рабочем объекте.
2. Характеристики, связанные с проектными техническими условиями.
3. Характеристики, связанные с машиной.

#### Характеристики, связанные с материалом и условиями на рабочем объекте

- **Тип грунта:** любой конкретный тип грунта отличается своими характеристиками уплотнения; грунты, хуже поддающиеся уплотнению, требуют применения более тяжелых катков.
- **Гранулометрический состав:** гранулометрический состав материала определяется диапазоном размеров частиц этого материала. В идеале присутствует приблизительно равное количество частиц всех размеров без преобладания частиц какого-то одного размера.
- **Однородность:** грунт представляет собой смесь грунтов различных типов с различными размерами частиц. Под однородностью подразумевается степень перемешивания всех входящих в состав материалов и их равномерное распределение по всему объему грунта. Однородная грунтовая смесь является гомогенной, и качество ее уплотнения отличается стабильностью; неоднородный грунт будет уплотняться неравномерно.

Коэффициент неоднородности ( $C_u$ ) в механике грунтов – это параметр, характеризующий неоднородность гранулометрического состава грунта. Он дает информацию о том, насколько равномерно распределены частицы

#### ФОРМУЛА ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА НЕОДНОРОДНОСТИ

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Характеристика грунта на основе значений коэффициента  $C_u$ :

$C_u < 5$  = однородный грунт

$C_u 5-15$  = неоднородный грунт

$C_u > 15$  = очень неоднородный грунт

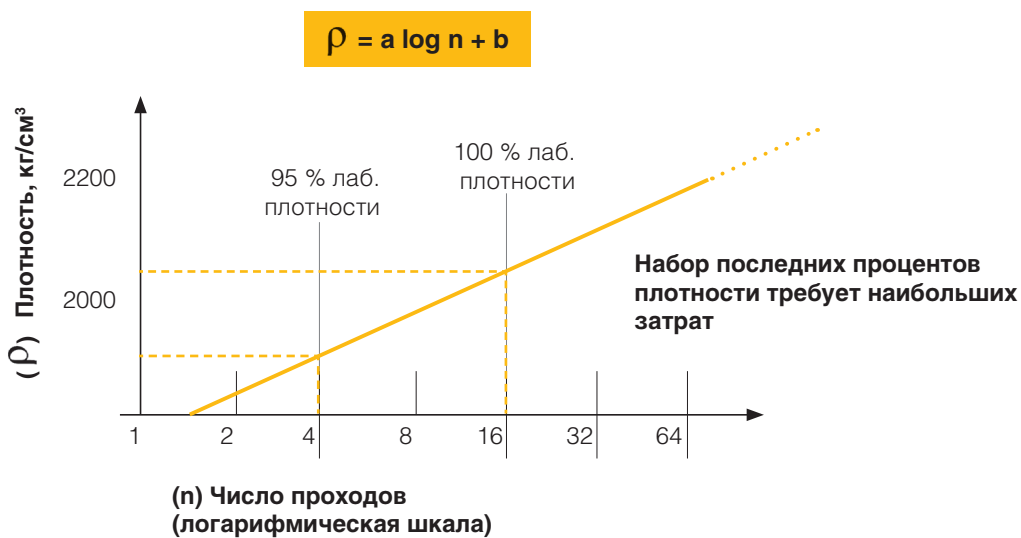
грунта по размерам. В стандарте DIN EN ISO 14688-2:2004 коэффициент  $C_u$  определяется как частное от деления диаметра  $d_{60}$  ячеек сита, через которое проходит 60 % частиц, к диаметру  $d_{10}$  ячеек сита, через которое проходит 10 % частиц. Это соотношение определяет наклон графика гранулометрического состава в диапазоне между точками прохождения 10 процентов и 60 процентов частиц через сита.



- **Текстура:** отдельные типы грунтов обладают различной текстурой поверхности частиц, которая оказывает влияние на характеристики уплотнения материала. Типы грунтов с грубой текстурой характеризуются высоким трением между частицами, требуя большей энергии от катка для ослабления этих связей, чтобы перейти в более плотное состояние. Частицы с плавной структурой легче скользят относительно друг друга, требуя меньше энергии для уплотнения.
- **Форма зерен:** подобно текстуре, форма частиц может влиять на уплотнение грунта. Частицы зазубренной формы создают более высокое трение, требующее более высокой энергии уплотнения. Гладкие частицы окатанной формы легче скользят относительно друг друга и требуют меньшего уплотняющего усилия.
- **Первоначальная плотность:** материалы с более высокой первоначальной плотностью требуют меньше энергии для уплотнения, чем материалы с менее высокой плотностью. Это затрагивает также производительность, поскольку для уплотнения менее плотного материала может потребоваться большее число проходов.
- **Влажность:** влажность – это один из наиболее важных факторов, подлежащих учету при уплотнении грунта. При слишком низкой влажности теряется взаимное сцепление частиц. При слишком высокой влажности частицы легко изменяют свое положение. Каждый тип грунта имеет свою влажность, которая оптимально подходит для уплотнения (эта влажность определяется при помощи испытания по Проктору).
- **Прочностные характеристики минеральных материалов:** каждый тип грунта имеет различную прочность на сжатие в зависимости от того, как он был сформирован.
- **Земляное полотно и его несущая способность:** прочность сооружения высока настолько, насколько позволяет его фундамент. Если земляному полотну не хватает несущей способности, чтобы служить опорой для дороги, уплотнение нижнего и верхнего слоев дорожного основания, вероятно, будет затруднено.

## ЦЕНА ПЛОТНОСТИ

С увеличением числа проходов плотность повышается

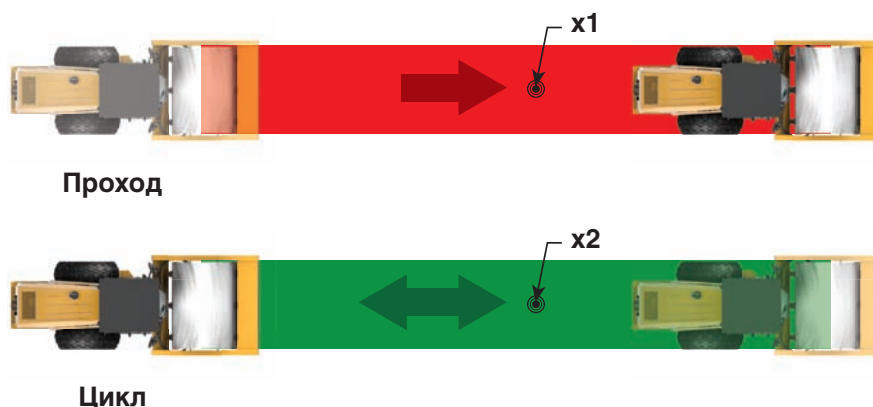


### Характеристики, связанные с проектными техническими условиями

- **Требуемая степень уплотнения:** обычно устанавливается по результатам стандартного или модифицированного испытания по Проктору в процентах от максимальной плотности сухого грунта по массе, определенной при испытаниях (например, 95 процентов стандартной плотности по Проктору). Обычно, чем выше требуемая степень уплотнения, тем большее число проходов требуется. Наибольшую трудность всегда представляет набор последних процентов плотности.
- **Толщина слоя:** при использовании катка определенного размера толщина слоя влияет на производительность. Для уплотнения толстого слоя требуется больше проходов, чем тонкого слоя.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

### ПОДСЧЕТ ЧИСЛА ПРОХОДОВ



- **Число проходов** – число раз, которое каток проходит по одному участку грунта. В компании Caterpillar принято считать проходом однократное прохождение по участку передним или задним ходом, а циклом называют два последовательных прохода по участку (обычно один передним ходом и один задним ходом).

Знание числа проходов может иметь важное значение, особенно при выявлении участка, не отвечающего техническим требованиям к уплотнению. Если при уплотнении объекта соблюдалось одинаковое число проходов

и один участок не отвечает требованиям, а остальные отвечают, это сужает круг возможных причин.

В тех случаях, когда используются технические требования на методы, задается требуемое число проходов (при соответствующем размере катка на слое предписанного состава и толщины). В этих случаях инженерами исходя из прошлого опыта установлено, что такое число проходов будет достаточным для достижения требуемой степени уплотнения.

### Характеристики, связанные с машиной

Конструкция катка является важным фактором динамики уплотнения грунта. К числу значимых факторов относятся размер рамы, общая масса, колесная база, отношение нагрузки на передний валец к нагрузке на колеса, баланс массы между левой и правой сторонами машины. В список можно включить еще такие факторы, как диаметр вальца, длина вальца, масса вальца, наличие амортизаторов ударов, масса дебаланса, а также расстояния от центра тяжести дебаланса до оси вальца. Даже вес топлива и оператора влияют на эксплуатационную эффективность катка. При проектировании машины производитель тщательно учитывает все эти факторы.

Вибрационное уплотнение происходит с помощью вальца (статическая нагрузка), который совершает колебательные движения по вертикали (амплитуда) с большой скоростью (частота) и при этом перемещается вперед (рабочая скорость) по поверхности неоднородного материала. Разумеется,



частота, амплитуда и рабочая скорость являются параметрами, которые регулируются оператором. Они будут рассмотрены ниже в разделе 3.

Все эти параметры означают, что наладить каток применительно к работе на конкретном объекте так, чтобы получить идеальные результаты уплотнения, не всегда бывает просто. Главной задачей оператора виброкатка является нахождение условий для достижения максимального передаваемого усилия

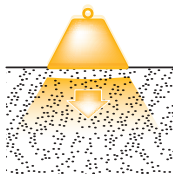
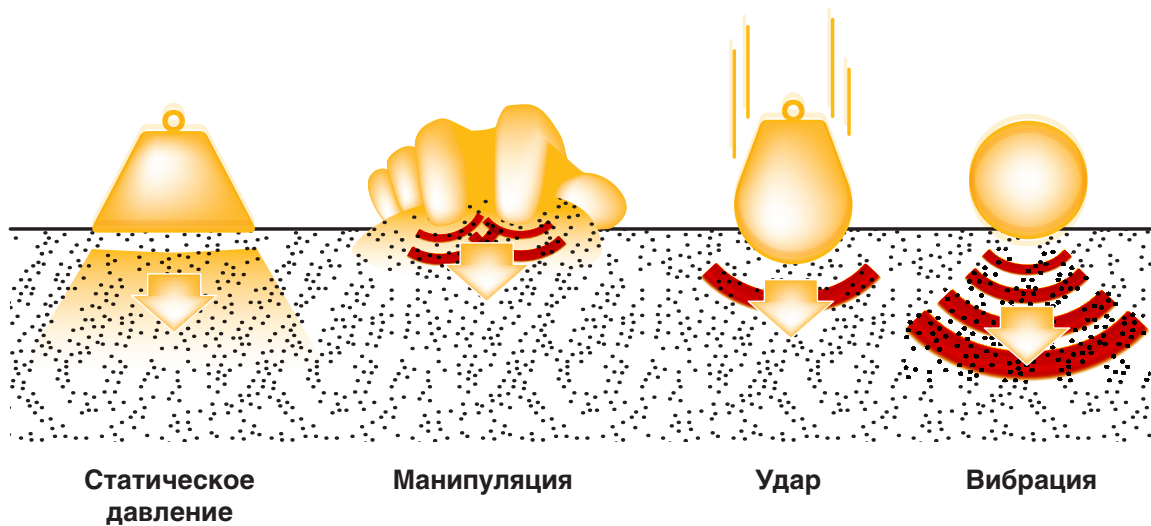
в уплотняемый материал. Это происходит, когда все факторы в совокупности – характеристики материала, характеристики катка, амплитуда, частота и скорость движения – оптимально подобраны для получения уплотняющего усилия, требуемого для соблюдения технического задания проекта.

### [ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВИБРАЦИОННОЕ УПЛОТНЕНИЕ]

Уплотнение – это процесс сжатия материала, имеющего определенный объем, до меньшего объема. Это осуществляется путем приложения силы и движения по площади контакта, что вызывает разрыв естественных связей между частицами внутри материала и сближение этих частиц. За счет комбинированного воздействия силы и движения пустоты, существующие между частицами (заполненные воздухом, водой или

тем и другим), выдавливаются. Для уплотнения грунта используют четыре вида сил:

1. Статическое давление.
2. Манипуляция.
3. Удар.
4. Вибрация.



**Статическое давление:** при статическом уплотнении давление, создаваемое весом катка, порождает в грунте напряжения сдвига, приводящие к смещению частиц относительно друг друга. Уплотнение происходит,

когда под действием приложенной силы отдельные частицы теряют свои естественные связи с другими частицами и перемещаются в более устойчивое положение. Такая сила уплотнения оказывает более выраженное воздействие на материалы на поверхности и небольшой глубине. Ее влияние на грунты глубокого залегания минимально.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Статическая линейная нагрузка является промышленно используемым показателем для сравнения эффективности уплотнения статических гладковальцовых катков. Эта нагрузка представляет собой силу, направленную вертикально вниз по всей ширине вальца и создающую напряжения сдвига, вызывающие уплотнение грунта. Она вычисляется путем деления веса на вальце (нагрузки на ось) на ширину вальца. Статическая линейная нагрузка выражается в килограммах на линейный сантиметр (кг/см) или фунтах на линейный дюйм (фунт/дюйм). Катки с более высокой линейной нагрузкой обладают более высокой эффективностью уплотнения и глубиной уплотнения.

### СТАТИЧЕСКАЯ ЛИНЕЙНАЯ НАГРУЗКА



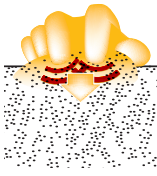
Статическая линейная нагрузка	
<b>Вибрационные катки для уплотнения грунта</b>	
5–8 т	16–22 кг/см (90–120 фунт/дюйм)
8–12 т	20–30 кг/см (100–200 фунт/дюйм)
12–15 т	30–45 кг/см (180–250 фунт/дюйм)
>15 т	45 кг/см + (250 фунт/дюйм +)
<b>Пневмоколесные катки</b>	<b>1000–3200 кг/колесо (2200–7000 фунт/колесо)</b>

В случае статических кулачковых катков с кулачками типа «пэдфут», «тампинг фут» и «шипфут» величина давления, оказываемого кулачками, постоянно меняется, поскольку меняется количество кулачков, контактирующих с грунтом, и площадь их контакта. Глубина внедрения в грунт также может влиять на результаты расчета. Давление торцовых поверхностей кулачков выражается в килограммах на квадратный сантиметр (фунтах на квадратный дюйм).

Статическое уплотнение используется в условиях, требующих осторожного обращения с грунтом: вблизи зданий, хрупких материалов или там, где поверхность имеет низкую несущую способность. Также оно используется в ситуациях, когда слишком высокое усилие уплотнения может привести к перемещению воды на поверхность.







**Манипуляция** – уплотняющее воздействие, обеспечивающее перемещение частиц в более плотную массу за счет перемешивания. Процесс перемешивания особенно активно происходит вблизи поверхности слоя материала.

Воздействие перемешиванием в продольном и поперечном направлениях очень важно для уплотнения грунтов, расположенных в виде пластов, таких как глинистые грунты. Кулачковые катки и пневмоколесные катки, передние и задние колеса которых смещены относительно друг друга, специально предназначены для оказания такого уплотняющего воздействия.

Манипуляция, создаваемая пневмоколесным катком, является следствием двух факторов: контактного давления и колесной нагрузки. Регулировка любого из этих факторов приведет к изменению эксплуатационной эффективности катка.

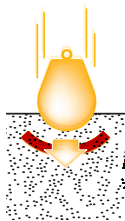


Уплотнение манипуляцией целесообразно применять для получения гидроизолированной поверхности, помогающей материалу сопротивляться действию воды и погодных условий.

### ФОРМУЛА РАСЧЕТА ДАВЛЕНИЯ КОНТАКТА

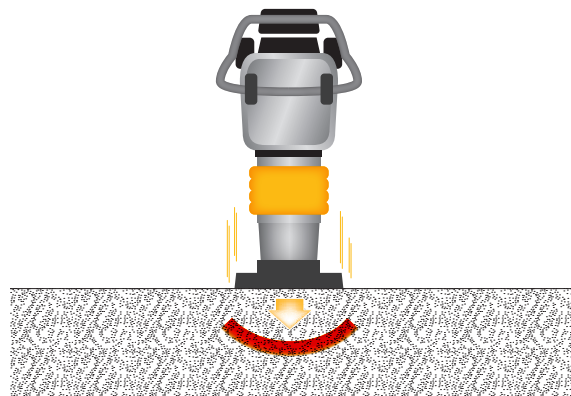
$$\text{КОНТАКТНОЕ ДАВЛЕНИЕ} \begin{matrix} \text{кг/см}^2 : \text{бар} \end{matrix} = \frac{\text{Нагрузка на колесо, кг}}{\text{Площадь контакта шины, см}^2}$$

$$\text{НАГРУЗКА НА КОЛЕСО} \begin{matrix} \text{кг} \end{matrix} = \frac{\text{Эксплуатационная масса катка}}{\text{Количество колес}}$$

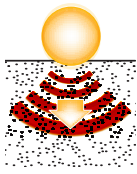


**Удар:** удар оказывает на уплотняемый материал усилие, большее, чем статическое усилие под действием силы тяжести. Это связано с тем, что груз в движении обладает скоростью, которая преобразуется в энергию в момент удара. Удар создает волну давления, которая проникает

в грунт с поверхности. Удары обычно наносятся сериями. Удары, наносимые с частотой 50–600 раз в минуту, считаются низкочастотными и характерны для гидромолотов и ручных трамбовок. Нанесение ударов с высокой частотой 1400–3000 раз в минуту используется на виброкатках.



## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ



**Вибрация:** вибрация – это, пожалуй, наиболее сложное и экономически эффективное уплотняющее воздействие. Более 90 процентов катков, продаваемых в настоящее время, являются вибрационными. Это связано с тем, что виброкаток способен

обеспечить такую же производительность, как статический каток, обладающий в три раза большей массой. Энергия вибраций делает виброкаток более эффективным, чем статический каток сопоставимых размеров.

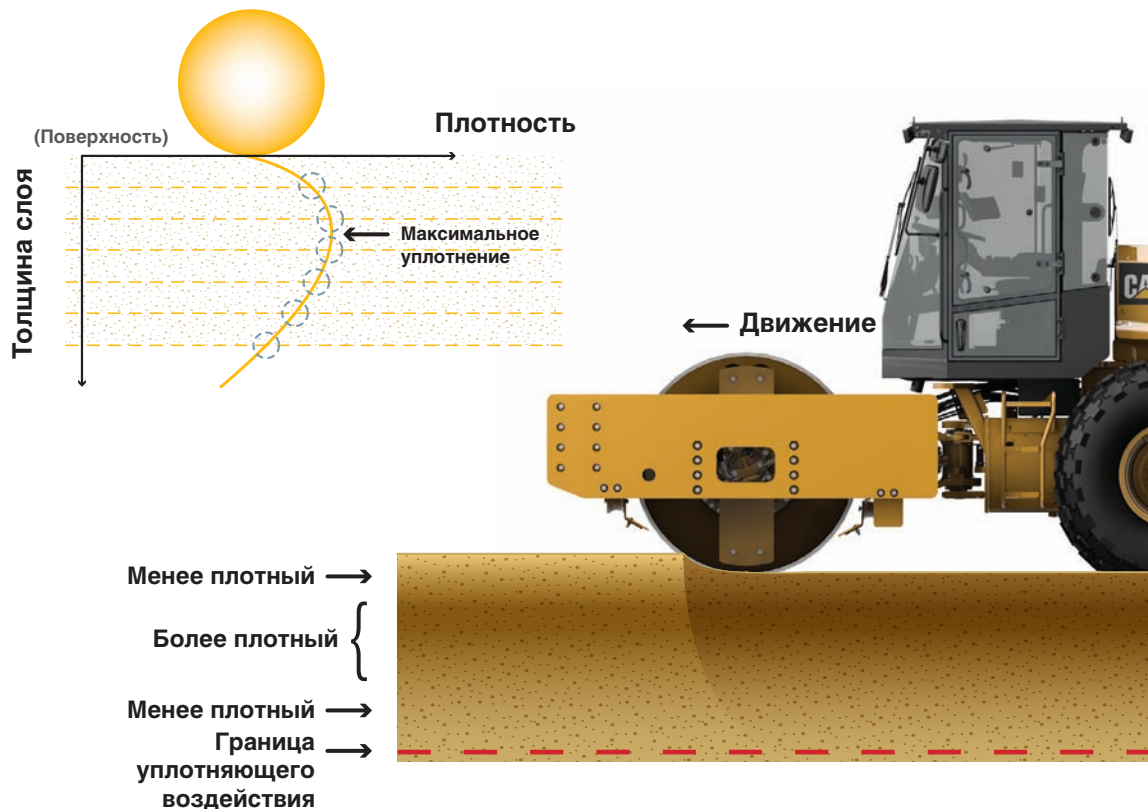
Вибрационные катки создают во время работы быструю последовательность волн давления, распространяющихся во всех направлениях. Вибрационные волны давления преодолевают сопротивление сдвигу между частицами уплотняемого материала. Под воздействием давления частицы изменяют свое положение, переходя в более плотное состояние (количество пор сокращается). Для того чтобы понять, как работает виброкаток, необходимо понимать, что собой представляют динамические параметры виброуплотнения:

амплитуда и частота, а также статическая линейная нагрузка и отношение вибрирующей массы к подвешенной массе.

При работе катка объем грунта под катком уплотняется в направлении сверху вниз неравномерно. Каток определенной массы способен уплотнять грунт на определенную глубину, но степень уплотнения грунта на протяжении от поверхности до максимальной глубины, которой достигает уплотняющее воздействие, будет изменяться. Обычно прилегающий к поверхности грунт уплотняется в меньшей степени, средний грунт имеет максимальную степень уплотнения, а грунт, лежащий ниже, также уплотняется меньше.

Путем изменения рабочих параметров можно изменять глубину зон уплотнения и глубину зоны максимального уплотнения, но это все равно не отменяет того факта, что грунт уплотняется неравномерно в направлении сверху вниз. Это явление называется градиентом уплотнения, и эти данные помогают выявить пригодность катка определенного размера или рабочих параметров настройки катка к конкретным условиям применения.

## ГРАДИЕНТ УПЛОТНЕНИЯ



На первый взгляд кажется логичным, что при движении катка наиболее плотный грунт должен находиться у поверхности. Однако в действительности максимальная плотность достигается ниже поверхности и затем снижается, поскольку глубина ослабляет воздействие катка. Это называется градиентом уплотнения.

**[ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРАЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ]**

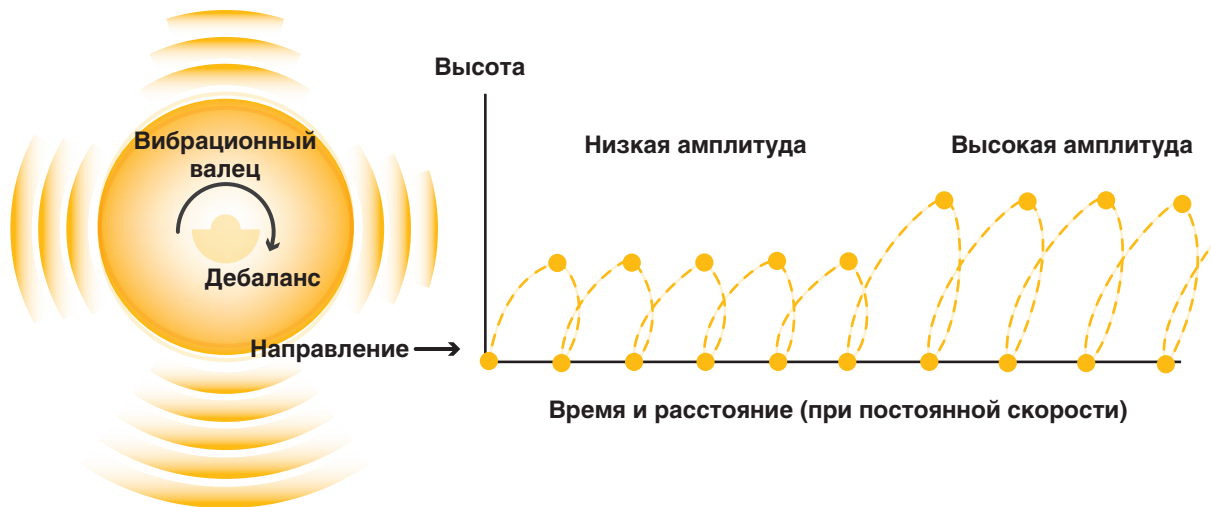
**Амплитуда** – максимальное вертикальное смещение вибрационного вальца от среднего положения его оси. Производители заявляют в технических характеристиках номинальное значение амплитуды, которое измеряется на подвешенном вальце. Однако реальная рабочая амплитуда является произведением номинальной амплитуды и коэффициента усиления, представляющего собой отношение передаваемой частоты к резонансной частоте машины и уплотняемого грунта. Правильнее подразумевать под амплитудой расстояние, на которое валец внедряется в грунт, вытесняя и уплотняя его.

Изменяя амплитуду вибрации, оператор может изменять силу и движение (ускорение) вальца на материале.

При приближении плотности грунта к максимуму наступает момент, когда грунт более не может поглощать энергию уплотнения, передаваемую виброкатком. В этот момент валец может отскочить от поверхности, и вибрационный цикл может произойти во время нахождения вальца в воздухе. Это явление называется козлением или двойным скачком и сопровождается явными и нехарактерно сильными вибрациями, охватывающими всю машину. Козление может привести к повреждению машины и получению нежелательных результатов на уплотняемом грунте, например к разуплотнению.

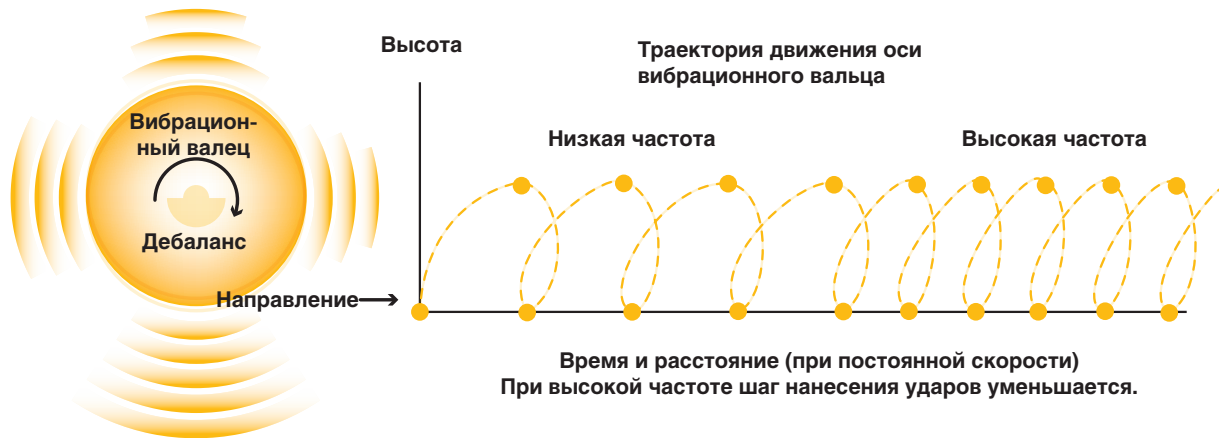
Для того чтобы прекратить козление, оператор должен снизить количество энергии, передаваемой машиной на грунт, путем простого уменьшения амплитуды, что позволит снизить уплотняющее воздействие на грунт. Другой вариант – перевод машины в статический режим.

**АМПЛИТУДА**



# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

## ЧАСТОТА



**Частота и скорость:** частота – это количество полных циклов вибрации (оборотов дебалансов вокруг оси вращения) в единицу времени. Частота обычно выражается в герцах (Гц) или колебаниях в минуту (кол/мин). Как правило, используются частоты в диапазоне 23–35 Гц (1380–2100 кол/мин) в зависимости от материала и установленной амплитуды.

Соотношение между частотой вибрации барабана и рабочей скоростью катка иногда упрощается до эмпирического правила, согласно которому частота вибраций и рабочая скорость катка должны быть отрегулированы таким образом, чтобы один удар приходился на 25–30 мм (1–1,2 дюйма) пути. Слишком

высокая рабочая скорость может привести к эффекту «стиральной доски» (шаг нанесения ударов слишком велик), а слишком низкая рабочая скорость может отрицательно сказаться на производительности машины. Для каждого конкретного условия уплотнения существует своя оптимальная скорость движения и частота, но правило «1 удар на 25 мм (1 дюйм)» должно соблюдаться. Сохранение равномерности уплотнения крайне важно, и использование систем автоматического регулирования скорости для обеспечения баланса между скоростью и частотой может помочь в достижении такой равномерности.

**Отношение вибрирующей массы к подвешенной массе:** можно предположить, что если виброкаток с определенной массой и амплитудой может уплотнить определенный грунт с определенной степенью эффективности, то простого увеличения масса и амплитуды достаточно, чтобы повысить эффективность работы катка на данном грунте. Это не всегда так.

На виброкатке вибрирующая масса (валец) изолирована от подвешенной массы (задней рамы), и соотношение между этими двумя массами является важным фактором определения возможной массы и амплитуды катка. Это соотношение тщательно балансируется для того, чтобы оптимизировать количество энергии, которое машина может безопасно передавать в грунт.



Полная рабочая масса



Подвешенная (невибрирующая) масса



Вибрирующая масса

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ



Резонанс ослабляет уплотняющее воздействие



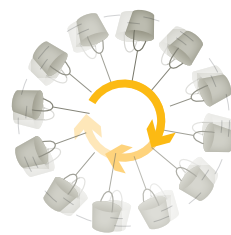
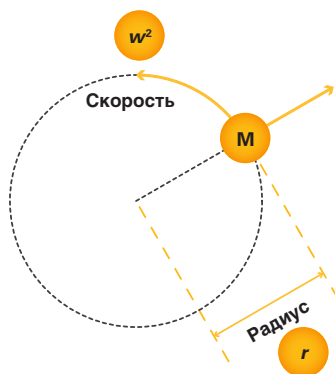
Резонанс действует в гармоническом взаимодействии с уплотняющим воздействием

**Резонанс:** когда частота вибраций, сообщаемых объекту, равна частоте собственных колебаний объекта, объект начинает вибрировать в режиме резонанса. Для вибрационного уплотнения резонанс очень важен.

Взаимодействие между уплотняемым материалом и вибрационной машиной приводит материал и машину в состояние вибрации. Дебалансы, вращающиеся внутри вальца, поддерживают эту вибрацию на частоте,

равной частоте вращения вала дебалансов. При определенных условиях на данной частоте машина и материал входят в резонанс. Условия, вызывающие резонанс, зависят не только от характеристик машины, но также от природы уплотняемого материала и достигнутой степени его уплотнения. Идеальной частотой, обеспечивающей наиболее эффективную передачу энергии уплотнения, является частота, на 15 процентов превышающая резонансную частоту.

## ЦЕНТРОБЕЖНАЯ СИЛА



### Центробежная сила = $Mw^2r$

Для вычисления центробежной силы масса ( $M$ ) дебаланса умножается на радиус ( $r$ ) вращения дебаланса и угловую скорость (частоту) вращения в квадрате ( $w^2$ ). Наиболее значимым множителем в уравнении является частота.

**Центробежная сила:** вибрационные катки создают центробежную силу при помощи дебаланса или дебалансов, вращающихся внутри вальца. Центробежная сила, порождаемая вальцом, аналогична тянущему усилию, которое ощущаешь при вращении ведра с водой на веревке. На величину центробежной силы влияет масса груза, удаленность оси вращения груза от центра тяжести, а также скорость вращения груза. Центробежная сила является теоретическим вычисляемым параметром, который часто

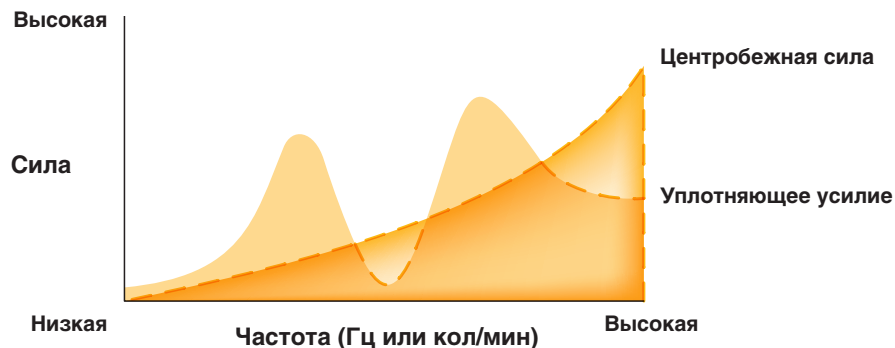
используется для оценки производительности виброкатков для уплотнения грунта. Но теоретическая центробежная сила не может обеспечить точную оценку возможностей машины. Истинная вибрационная сила зависит от взаимодействия уплотняемого грунта и машины в целом.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

### СИЛА И ЧАСТОТА

Этот график показывает, как увеличивается теоретическая центробежная сила с повышением частоты. Однако уплотняющее усилие, реально передаваемое на грунт, с повышением частоты изменяется неравномерно. Уплотняющее усилие имеет несколько «пиков» и «впадин».

Обычно имеется первый пик, соответствующий максимальному уплотняющему усилию, которое сначала быстро падает, а затем сменяется вторым пиком. Как правило, уплотняющее усилие, соответствующее второму пику, выше, этот пик соответствует наилучшей производительности машины.



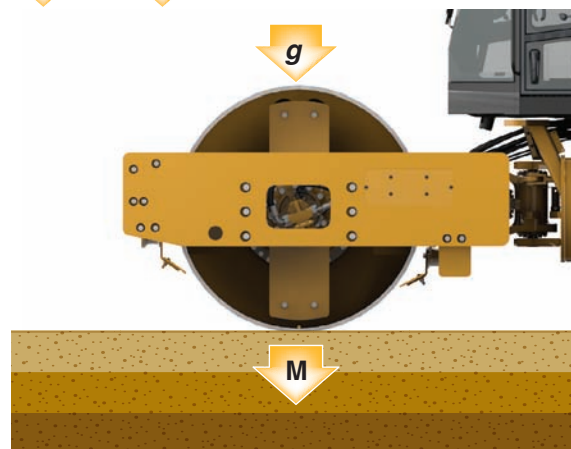
### ПОЛНАЯ ПРИЛОЖЕННАЯ СИЛА ( $F_{TA}$ )

$$F_{TA} = F_C + F_S$$

где  $F_C$  – центробежная сила =  $1100 \cdot (M) \cdot (r) \cdot \left(\frac{N}{1000}\right)^2$

и  $F_S$  – статическая нагрузка от вальца =  $M \cdot g$

- $M$  Масса дебаланса, кг
- $r$  Эксцентриситет, м
- $N$  Число оборотов в минуту
- $M$  Статическая весовая нагрузка от вальца, кг
- $g$  Ускорение силы тяжести,  $\frac{м}{с^2}$



**Полная приложенная сила:** полная приложенная сила определяется максимальным количеством вибрационной энергии, которое каток может передать на землю. Она вычисляется путем сложения массы катка и центробежной силы. Как и в случае

центробежной силы, следует с осторожностью использовать этот показатель для сравнения эффективности уплотнения различных катков.

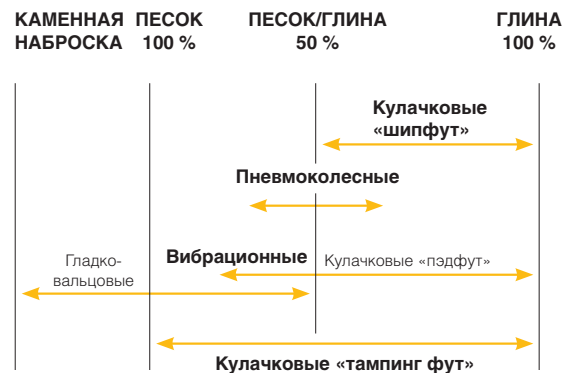
## [ МАШИНЫ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА ]

При выборе машин для уплотнения необходимо учитывать большое число факторов. Выбор машин для проекта порой бывает обусловлен прежним опытом подрядчика, типом грунта, техническими требованиями на технологию работ или имеющейся в наличии техникой. Еще один фактор связан с тем, насколько хорошо машина может справляться с работами по перемещению и разравниванию грунта. Климатические условия и тягово-сцепные свойства также играют важную роль. Иногда на процессе принятия решения сказывается заинтересованность подрядчика в том, чтобы стандартизировать парк техники.

Приведенная здесь схема содержит указания по выбору техники в зависимости от типов грунтов. Не существует какого-то одного катка, способного выполнять все задачи во всех эксплуатационных условиях. Для каждого типа катков имеется свой материал и рабочий диапазон, для которых его применение является наиболее экономичным. Во многих случаях условия применения позволяют достичь требуемой степени уплотнения путем применения машин различных типов и размеров; но при выборе более всего подходящей машины работы выполняются наиболее экономично и эффективно за счет снижения числа проходов, расхода топлива и затрат рабочего времени.

**Вибрационные катки:** виброкатки уплотняют грунт путем изменения положения частиц для уменьшения объема пустот, повышения плотности и несущей способности. Применяются два типа виброкатков: с гладкими вальцами и с кулачковыми вальцами типа «пэдфут». Гладковальцовые катки могут для повышения их универсальности оснащаться опциональными комплектами съемных кулачковых обечаек, что позволяет использовать гладковальцовые катки на работах, требующих применения кулачковых катков, хотя эксплуатационная эффективность несколько снижается.

## СХЕМА ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ



Гладковальцовые виброкатки оказывают три уплотняющих воздействия: статическое давление, удар и вибрацию. Машин с кулачковыми вальцами типа «пэдфут» оказывают, помимо этих видов воздействия, также воздействие манипуляцией. Виброкатки обеспечивают равномерное уплотнение всего слоя грунта.

Плотность набирается за счет сил, возникающих при ударе вибрационного вальца о землю. Результаты уплотнения являются функцией частоты и амплитуды колебаний, а также силы ударов и периода времени, в течение которого наносятся удары.



## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ



*Овальные кулачки хорошо подходят для связных грунтов и слоев увеличенной толщины*

Взаимосвязь между частотой и временем объясняет пониженные рабочие скорости виброкатков. Рабочая скорость имеет важное значение, поскольку определяет, как долго будет уплотняться данный участок. В случае виброкатков наилучшие результаты достигаются при скорости 1–2,5 км/ч (0,6–1,6 миль/ч) для камней и глины и 2–5 км/ч (1,2–3 миль/ч) для гравия и песка.

Гладковальцовые виброкатки были первыми вибрационными машинами, выпуск которых был освоен. Их применение наиболее эффективно на зернистых материалах крупностью от крупных камней до мелкого песка. Их также используют на полусвязных грунтах с содержанием связного грунта до 50 %. Толщина уплотняемого слоя зависит от размера катка. При уплотнении наброски из крупных камней толщиной слоев может быть очень велика и слои толщиной до 1,2 м (4 футов) не являются чем-то необычным. При уплотнении набросок из крупных камней следует помнить, что толщина слоя должна быть приблизительно на 300 мм (12 дюймов) больше размера наиболее крупных камней. Это позволяет достичь консолидации слоя без выступания крупных камней над поверхностью.

Кулачковые катки с кулачками «пэдфут» пригодны для уплотнения более широкого диапазона материалов, включая грунты, содержащие более 50 процентов связного материала и имеющие более высокое содержание мелких фракций. Когда кулачок проникает в верхнюю часть слоя грунта, он разрывает естественные связи между частицами связного грунта и обеспечивает лучшие результаты уплотнения. Кулачки расположены по спирали, чтобы при выходе из грунта не разрыхлять его, и имеют конусную форму, чтобы оставаться чистыми. Типичная

*Компания Caterpillar также предлагает в качестве дополнительного оборудования комплекты съемных обечаек с кулачками «пэдфут» для гладковальцовых катков. Комплект состоит из двух половин, которые крепятся болтами к гладкому вальцу, позволяя использовать каток на связных грунтах как обычный кулачковый каток «пэдфут». Комплекты могут иметь исполнение как с квадратными кулачками, так и с овальными кулачками.*



*Квадратные кулачки более всего подходят для полусвязных грунтов и более тонких слоев*

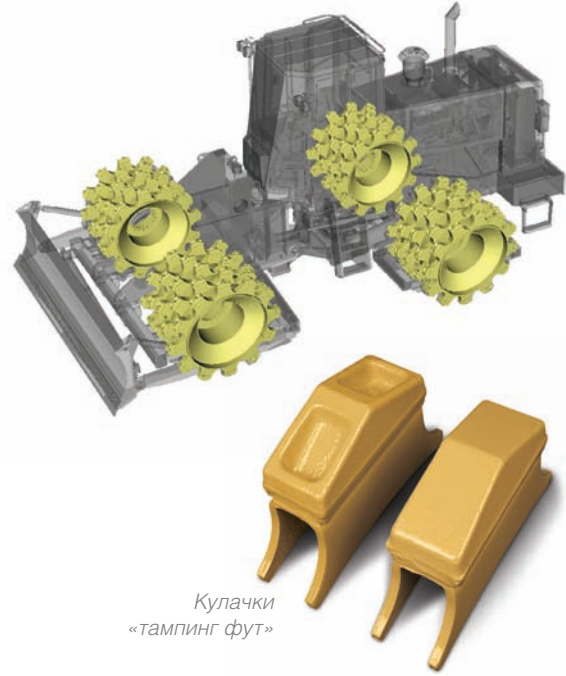
толщина слоя связного грунта для катков с кулачковыми вальцами «пэдфут» составляет 150–460 мм (6–18 дюймов).

Компания Caterpillar выпускает катки «пэдфут» с кулачками двух видов: с квадратным поперечным сечением и овальными. Катки, кулачки которых имеют квадратное сечение, хорошо уплотняют полусвязные грунты и тонкие слои грунта толщиной менее 150 мм (6 дюймов). Кулачки квадратного сечения хорошо гидроизолируют поверхность.

Кулачки овального сечения имеют меньшую площадь поверхности, чем кулачки квадратного сечения, и поэтому оказывают на грунт более высокое давление, чем квадратные кулачки. Такие кулачки проникают глубже в уплотняемый слой. Катки, кулачки которых имеют овальное сечение, хорошо уплотняют связные грунты и более толстые слои толщиной 150–460 мм (6–18 дюймов). Кулачки овального сечения не гидроизолируют поверхность так же хорошо, как это делают кулачки квадратного сечения.







**Кулачковые катки с кулачками типа «тампинг фут»** – высокоскоростные, самоходные катки статического действия. Эти катки обычно имеют четыре стальных кулачковых колеса и оснащены бульдозерным отвалом. Наконечники зубьев конусные, с прямоугольными торцовыми площадками.

Катки «тампинг фут» уплотняют слой грунта снизу вверх. Поскольку кулачки имеют конусную форму, они могут выходить из грунта, не разрыхляя его. Поэтому верхняя часть слоя также уплотняется, и поверхность становится сравнительно ровной и гидроизолированной. Катки «тампинг фут» способны развивать скорость 16–32 км/ч (10–20 миль/ч), но обычно работают в диапазоне скоростей 10–15 км/ч (6–10 миль/ч).

Как правило, для достижения требуемой плотности слоев толщиной 200–300 мм (8–12 дюймов) требуется 2–3 цикла уплотнения (4–6 проходов), хотя в случае пластичной глины плохого гранулометрического состава или очень тонкодисперсной глины может потребоваться 4 цикла. Катки «тампинг фут» эффективно работают на всех грунтах, кроме чистого песка.

**Кулачковые катки с кулачками типа «шипфут»:** своим названием (шипфут – «козья ножка») эти катки обязаны тому факту, что древние римляне при строительстве дорог гоняли по ним стада овец для уплотнения дорожного основания. Слово «шипфут» стало общим термином, применяемым к кулачковым вальцам всех типов. В действительности каток «шипфут» очень сильно отличается от катков с кулачками «пэдфут» или «тампинг фут».

Катки «тампинг фут» оставляют за собой довольно ровную, гидроизолированную поверхность, что позволяет грузодоставочным машинам поддерживать высокую скорость при движении по насыпи. Кроме того, поскольку оснащенные бульдозерным отвалом катки «тампинг фут» выполняют как разравнивание, так и уплотнение, подрядчик может сократить число гусеничных машин для распределения грунта.

Катки «тампинг фут» более всего подходят для крупных объектов. Им нужны длительные, непрерывные проходы для набора скорости и обеспечения высокой производительности. На слоях грунта толщиной более 300 мм (12 дюймов) производительность катков «тампинг фут» в 2–3 раза выше производительности одновальцовых виброкатков. Условия применения, размеры объекта и экономические соображения, лежащие в основе принимаемого решения, определяют то, какая машина является наилучшей.

Кулачок «шипфут» имеет форму цилиндра длиной обычно 200 мм (8 дюймов). Кулачок имеет круглое сечение, диапазон диаметров которого составляет 76–127 мм (3–5 дюймов). Кулачки «пэдфут» или «тампинг фут» имеют конусную форму с овальным или прямоугольным сечением. Торцовая площадка этих кулачков меньше, чем основание кулачка, – это важное отличие.



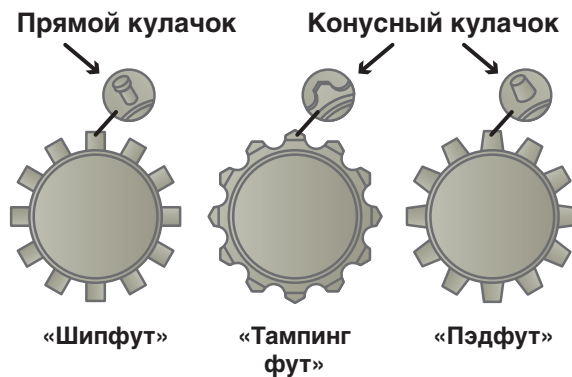
Кулачки «шипфут» проникают в грунт сверху и действительно уплотняют слой грунта вниз. При выходе кулачка из грунта он отбрасывает вверх или разрыхляет материал. В результате на поверхности образуется рыхлый слой материала. При отсыпке еще одного слоя верхний слой будет разрыхлен, а предшествующий слой уплотнен. Катки «шипфут» действительно осуществляют уплотнение снизу вверх.

Использование катков «шипфут» дает одно явное преимущество. Поскольку верхний слой грунта всегда разрыхляется, этот процесс помогает аэрировать и осушать влажные глины и пылеватые грунты.

Однако у катков «шипфут» также имеются многочисленные недостатки. Рыхлый верхний слой может действовать как губка во время дождей и замедлять процесс уплотнения. Рыхлый материал также замедляет движение техники, подвозящей материал для отсыпки, и поэтому продолжительность рабочего цикла транспортировки материала возрастает.

Кроме того, катки «шипфут» могут работать только на скоростях начиная с 6–10 км/ч (4–6 миль/ч), что исключает все преимущества от ударного и вибрационного воздействия. Давление и манипуляция являются единственными уплотняющими воздействиями на грунт. На слоях толщиной 200 мм (8 дюймов) для достижения требуемой плотности грунта обычно необходимо 6–10 циклов (12–20 проходов). Катки «шипфут» более не находят широкого применения.

### ТИПЫ КУЛАЧКОВ



**Пневмоколесные катки:** пневмоколесные катки используются для уплотнения грунта на объектах малого и среднего размера, преимущественно для уплотнения зернистых материалов дорожных оснований. Часто они применяются в качестве отделочного катка после завершения уплотнения слоя вибрационным катком. Пневмоколесные катки наилучшим образом подходят для гидроизоляции поверхности, специальных условий применения, таких как уплотнение тонких слоев, или выполнения особых требований, обусловленных техническим заданием.

Уплотняющие воздействия (давление и манипуляция), создаваемые резиновыми шинами, повышают плотность, действуя сверху вниз. Величину уплотняющего воздействия можно изменять, регулируя давление в шинах (обычный метод) или изменяя массу балласта (реже используемый метод). Перемешивающее действие колес, расположенных со смещением относительно друг друга, формирует гладкую и гидроизолированную поверхность.

Пневмоколесные катки можно использовать на грунте и асфальте. Это преимущество позволяет дорожному подрядчику использовать один каток для различных этапов строительства.





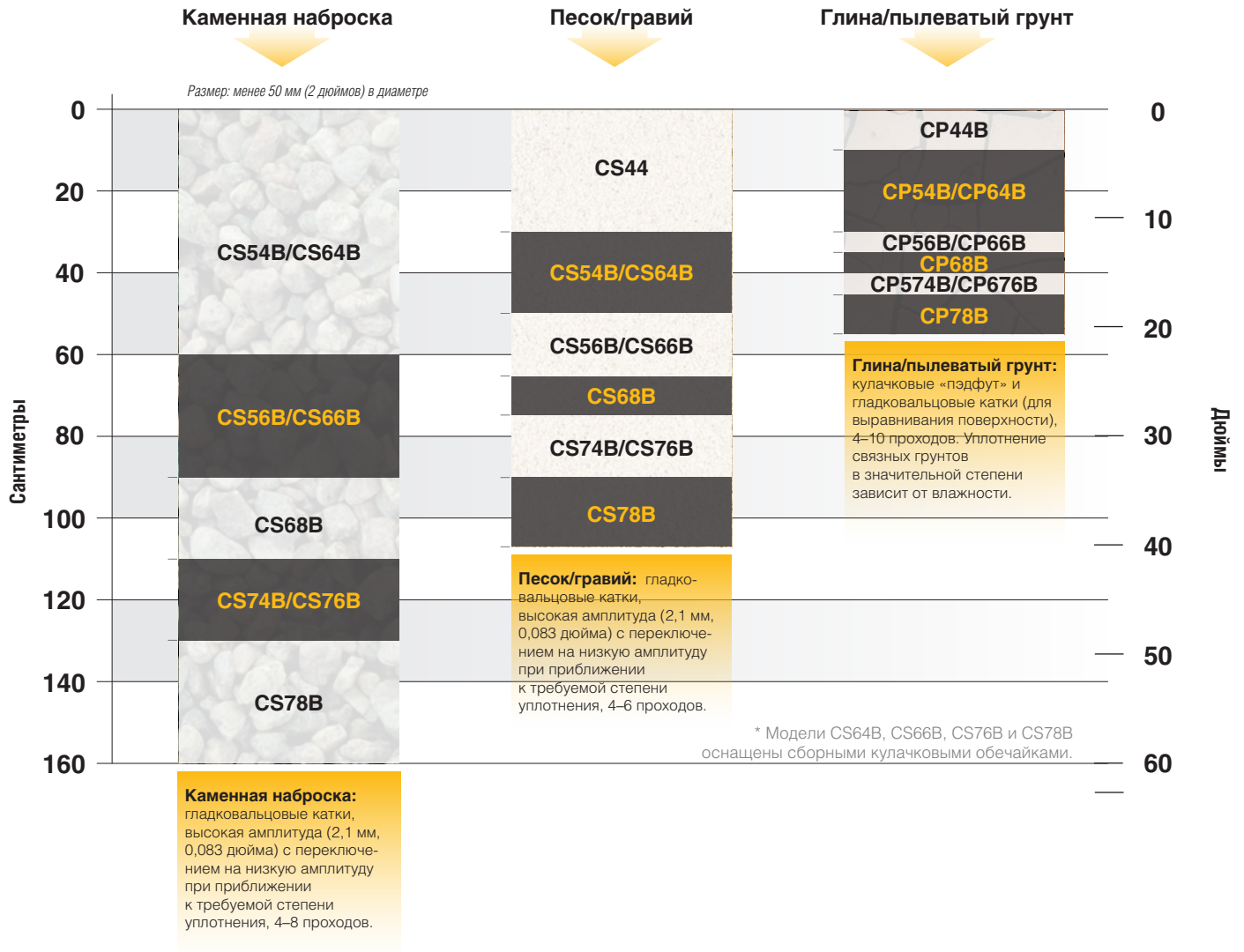
### **Задненавесные вибрационные плиты:**

при уплотнении несвязных материалов одновальцовые вибрационные катки для уплотнения грунта могут оснащаться задненавесной вибрационной плитой, придающей поверхности гидроизоляцию, недостижимую при применении одновальцового катка без плиты. Это позволяет оператору корректировать градиент уплотнения: одновальцовый вибрационный каток обеспечивает глубокое уплотнение, а вибрационная плита уплотняет и гидроизолирует поверхность.

Когда вибрационные плиты не требуются, их следует снимать с машины, поскольку их масса может снизить линейную нагрузку вальца, что может увеличить число проходов, необходимое для достижения заданной степени уплотнения.

## ГЛУБИНА УПЛОТНЕНИЯ

Предполагается, что заданная степень уплотнения составляет 95 % плотности, определенной методом стандартного испытания по Проктору, и может существенно различаться при различных грунтовых условиях.

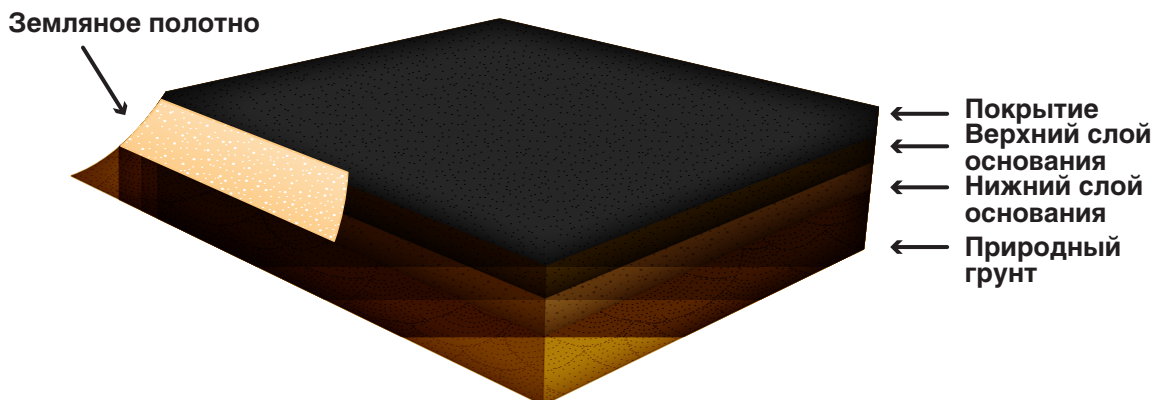




## Раздел 4 ПРАКТИКА УПЛОТНЕНИЯ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

Условия проекта оказывают значительное влияние на отсыпку грунта и его уплотнение. Знание того, как достичь максимальных результатов в самых различных условиях, поможет вам максимально повысить эффективность ведения работ и избежать переделок. Проверенные временем и новые методы измерения также могут принести пользу при управлении проектами в области уплотнения.





### [ **КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СООРУЖЕНИЙ НА РАБОЧИХ ОБЪЕКТАХ** ]

Подобно любому другому сооружению, дорога состоит из специальных конструктивных элементов, которые выполняют свои особые функции. Названия этих конструктивных элементов могут иметь региональные различия, но все они работают вместе для того, чтобы выдерживать нагрузку, создаваемую транспортными средствами.

**Природные, или естественные, грунты:** эти грунты, иногда называемые подстилающими грунтами, служат основанием для земляного полотна и состоят из грунтов и материалов, сформировавшихся естественным путем без вмешательства человека и химической обработки. В процессе строительства дороги поверхностный слой грунта срезается для формирования ровной горизонтальной поверхности. Обнажаемые материалы на дне выемки представляют собой природный грунт. Если существующие материалы неспособны выдержать нагрузку от дорожной одежды, они модифицируются или заменяются подходящими материалами. Модификация может быть выполнена механическим способом, включающим уплотнение, усиление геотканью или ввод минеральных материалов; или химическим способом, включающим ввод вяжущих, таких как портландцемент; или комбинацией механического и химического способов. Цель состоит в том, чтобы повысить несущую способность материала. В итоге это основание должно стать надежной опорой для расположенной на нем конструкции.

**Земляное полотно** – сооружение в виде насыпи, верхняя поверхность которой расположена выше окружающей поверхности. Земляное полотно имеет определенную ширину и служит основанием для дорожной одежды с заданной высотой и уклоном. В некоторых случаях естественные неровности рельефа могут требовать отсыпки материала для создания надлежащего грунтового основания для дорожной одежды. С этой целью сооружают земляное полотно путем отсыпки и уплотнения соответствующих минеральных материалов,

пока высота участка не достигнет требуемого значения.

**Нижний слой основания:** основным назначением этого слоя является распределение нагрузки от сооружения, которое он поддерживает, на подстилающий грунт и обеспечение сравнительно ровной поверхности для размещения верхнего слоя основания. Однако нижний слой основания также может иметь ряд дополнительных функций в зависимости от состава материалов подстилающего грунта: например, он может обеспечивать функции фильтрации или служить барьером на пути движения капиллярной воды. Обычно этот слой состоит преимущественно из материалов подстилающего грунта, которые при необходимости модифицируются и уплотняются. Возможно устройство нескольких нижних слоев дорожного основания. Слои добавляются при необходимости для того, чтобы выдержать высокие нагрузки. В большинстве случаев минеральные материалы, используемые в составе нижнего слоя основания, бывают крупнее минеральных материалов, используемых в составе тех слоев, для которых нижний слой основания служит опорой.

**Верхний слой основания:** верхние слои основания выполняют ту же функцию, что и нижние. Они также распределяют нагрузку, которую несут, и обеспечивают защиту от воды и замерзания. В зависимости от требуемой нагрузки, они могут состоять из одного или нескольких слоев. Верхний слой основания состоит из специальной гравийной смеси с размером частиц меньше, чем в нижнем слое основания.

Асфальтобетонная смесь укладывается на это основание. От качества этого основания зависит долговечность уложенного на него асфальтобетонного покрытия. Для получения дополнительной информации об асфальтобетонном покрытии см. аналогичную брошюру Caterpillar «Руководство по уплотнению асфальта».



**[ТЕХНОЛОГИЯ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА]**

**ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТ**

Перед планированием работ по уплотнению подрядчик должен рассмотреть следующие основные вопросы:

- Каков гранулометрический состав грунта и к какому типу грунт относится?
- Какова максимальная плотность сухого грунта и оптимальная влажность?
- Какова требуемая степень уплотнения (%)?
- Какие регулируемые параметры и скорость имеет каток?
- Какова толщина слоя?

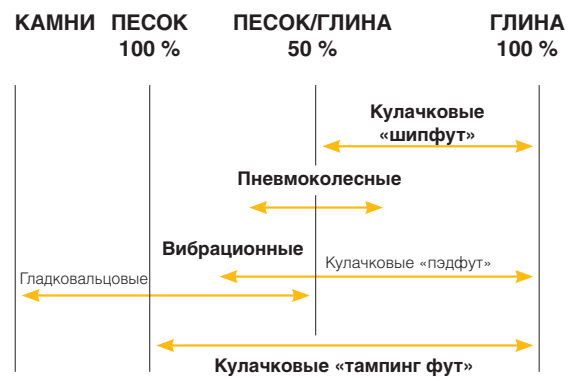
Подрядчику необходимо знать материал, требования и область применения каждого типа оборудования. После выяснения всех этих вопросов подрядчик может приступить к поиску наилучшего способа выполнить задание и рассмотреть при этом имеющиеся в его распоряжении технологии.

**Условия применения и выбор катков**

**по массе:** рабочие характеристики катков различных типов приведены в следующей таблице. Для сравнения на схеме показаны области наиболее эффективного применения каждого типа катков. Эти области могут пересекаться, и нередко можно встретить машины, осуществляющие уплотнение материалов, выходящих за границы их нормальной области применения. Поэтому приведенную в таблице и на схеме информацию следует рассматривать лишь как усредненные рекомендации по применению.

**Применение на земляных работах:** земляные работы охватывают широкий круг строительных работ, включая подготовку оснований, планировочные работы, обратную засыпку и засыпку водоемов. Объектом может быть строительная площадка, дорога или другая поверхность или конструкция.

**СХЕМА ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ**



**РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТКОВ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА**

*Только самоходные машины*

Машина	Кулачковые «шипфут»	Пневмоколесные (15 т и выше)	Кулачковые «тампер фут»	Вибрационные
<b>Толщина уплотненного слоя, мм (дюймы)</b>	150–300 (6–12)	150–300 (6–12)	150–300 (6–12)	150–600 (6–24)*
<b>Средняя рабочая скорость, км/ч (миль/ч)</b>	6–10 (4–6)	6–19 (4–12)	16–32 (10–20)	2–8 (2–5)
<b>Число циклов</b> (1 цикл = 2 прохода машины)	6–10	3–8	4–8	2–4

\* В зависимости от массы катка и требуемой степени уплотнения.

## ПРАКТИКА УПЛОТНЕНИЯ



### Каменная наброска:

камень получает все более широкое применение при строительстве насыпей автодорог. Он также широко используется

при сооружении насыпей в строительстве дамб, аэродромов, зданий и портов. Разрушенный взрывом скальный грунт часто содержит настолько много каменной мелочи, что, если наброску не уплотнять, это приведет к значительной осадке.

Каменную наброску обычно распределяют слоями толщиной 450–1200 мм (18–48 дюймов). Распределение материала до уплотнения имеет важное значение. При распределении материала слоями при помощи трактора образуется однородная наброска, поскольку бульдозерный отвал обеспечивает некоторую переориентацию камней, а гусеницы создают определенное уплотнение. Полученная таким

образом сравнительно плотная и ровная поверхность готова для работы катка.

После распределения необходимо интенсивное уплотняющее воздействие для того, чтобы сдвинуть и переместить крупные обломки и обеспечить тем самым необходимую плотность и устойчивость насыпи. Для выполнения этой работы применяют самые крупные гладковальцовые виброкатки. Но на каменных набросках катки все же подвергаются большим перегрузкам. Валец должен иметь толстую оболочку из высокопрочной стали. Если уплотнение сопровождается дроблением материала на поверхности, число проходов, возможно, придется сократить. Или, если машина оснащена системой с несколькими значениями амплитуды, можно выбрать низкую амплитуду для того, чтобы снизить дробление материала на поверхности.



### Песок и гравий:

вибрационное уплотнение гладковальцовыми машинами является особенно удобным и экономичным для песка и гравия. Высокая плотность может быть достигнута за небольшое число проходов, а толщина слоя определяется массой катка.

Песок и гравий с естественным водоотводом, содержащие менее 10 процентов мелких фракций, легко уплотняются, особенно в водонасыщенном состоянии. Когда к плотности предъявляются повышенные требования и толщина слоев велика, следует добавить воду. В процессе уплотнения эта вода уйдет из слоя.

Если песок и гравий содержат более 10 процентов мелких фракций, такой грунт уже не имеет естественного водоотвода и при высокой влажности становится упругим. Такой тип грунта имеет оптимальную влажность, при которой может быть достигнута максимальная плотность. Для достижения оптимальной влажности может потребоваться обезвоживание влажного грунта.

На насыпях из песка и гравия с плохо подобранным гранулометрическим составом трудно получить высокую плотность материала, расположенного близко к поверхности. Причина состоит в низком сопротивлении однородных грунтов сдвигу, вследствие чего верхний слой грунта выжимается вальцом вверх. На практике, когда уплотняется насыпь в несколько слоев, это явление не имеет большого значения. Предыдущий верхний слой уплотняется при укатке следующего. Однако при проведении контроля плотности эту особенность уплотнения поверхностного слоя следует учитывать.



*Когда влажность ниже оптимального значения, для достижения надлежащего уплотнения можно добавить воду*

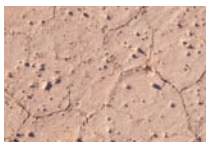


**Пылеватый грунт:** пылеватые грунты – это непластичный материал, состоящий из очень мелких частиц, уплотнение которого обычно осуществляют

гладковальцовыми виброкатками. Отсыпать и уплотнять такие грунты можно слоями большой толщины.

Подобно всем мелкозернистым грунтам, их уплотняемость зависит от влажности. Для того чтобы уплотнение дало наилучшие результаты, влажность не должна слишком

сильно отклоняться от оптимального значения. Если содержание воды в таком грунте слишком высоко, он быстро разжижается и уплотнение становится невозможным. Это может привести к необходимости аэрации слоев грунта дисковыми боронами, смешивания с более сухим грунтом (дорогостоящая процедура) или лучшего осушения грунта из резерва. Пылеватые грунты, которые также содержат глину, могут иметь значительную связность. Для уплотнения таких грунтов лучше применять кулачковые катки «пэдфут», «тампинг фут» или пневмоколесные катки.



**Глина:** глины обладают пластичностью, а значит, их показатели уплотняемости сильно зависят от влажности. При низкой влажности глина становится твердой и плотной. Если

влажность превышает оптимальную, глина становится все более и более пластичной и плохо поддается уплотнению.

При уплотнении глин основной проблемой часто является изменение их влажности. Смачивание водой при помощи цистерн, дисковых борон или дорожных фрез отнимает много времени. Другой, более эффективный способ – замачивание грунта в резерве. Просушивание влажной глины возможно лишь в условиях теплого и сухого климата даже при использовании бороны или дорожной фрезы. Иногда для этого прибегают к продолжительной укатке кулачковыми катками типа «шипфут».

Даже при оптимальной влажности глина по сравнению с несвязными грунтами требует более высокого уплотняющего усилия и меньшей толщины уплотняемого слоя. Кулачковые катки типа «пэдфут» дают наилучшие результаты, поскольку кулачки, проникая в грунт, разрушают естественные связи между частицами. Пневмоколесные катки можно использовать для уплотнения глин с числом пластичности от низкого до среднего.

В проектах с повышенными требованиями к производительности и использованием глины для отсыпки хорошие результаты дает применение кулачковых катков типа «тампинг фут» совместно с кулачковыми виброкатками типа «пэдфут». Кулачковые катки типа «тампинг фут», оснащенные бульдозерным отвалом, эффективно разравнивают отсыпку и дробят крупные, прочные комья глины, часто встречающиеся в глиняных резервах. Эти машины выполняют первые проходы. Окончательное достижение требуемой плотности обеспечивается кулачковыми виброкатками типа «пэдфут».



*Когда влажность слишком высока, рыхление грунта повышает скорость его осушения*

### **Верхние и нижние слои оснований:**

устройство верхних и нижних слоев оснований осуществляют на земляном полотне или поверхности естественного грунта. Эти слои служат опорой для размещения на них сооружений, таких как дорога или здание. Их прочность возрастает по мере приближения к поверхности. Материалы, используемые для этих слоев, зависят от типа нагрузок, которые должны выдерживать дорога или здание.

### **Природный (естественный) грунт:**

с экономической точки зрения, использование местного грунта является наиболее целесообразным. Если эти грунты подходят, их можно использовать без химической обработки или добавок. Надлежащее уплотнение этих грунтов существенно повысит их несущую способность и позволит взять под контроль другие факторы, такие как водопроницаемость, капиллярное действие, усадка и набухание.

### **Укрепленные грунты (стабилизация грунта):**

перемешивание химических реагентов с естественным или привозным грунтом может существенно улучшить устойчивость грунта и его несущую способность. Этот процесс называется стабилизацией грунтов.

После смешения извести или цемента с грунтом грунт уплотняется виброкатком. Тип используемого катка зависит от исходных (до обработки) характеристик грунта; но в большинстве случаев используется виброкаток массой 15 т (33 000 фунтов) или более. Если приходится уплотнять большой объем связного грунта, применение кулачкового катка типа «тампинг фут» может оказаться более экономичным, чем применение виброкатка. Малые объемы могут уплотняться пневмокатком.

В начале работы рекомендуется выполнить испытание на возможность применения стабилизации, чтобы убедиться в том, что результаты положительны.

**Щебень:** в технических условиях на ведение работ может оговариваться использование щебня с хорошо подобранным гранулометрическим составом в качестве материала для верхнего и нижнего слоев основания. Использование щебня позволяет контролировать его гранулометрический состав в процессе дробления для соответствия техническим условиям. Щебень, как правило, легче распределять и уплотнять, чем мелкозернистый грунт. Кроме того, результаты уплотнения более предсказуемы. Однако эти преимущества, касающиеся уплотнения, сводятся на нет расходами на дробление

Обычно выдаются очень строгие технические условия на материалы верхнего и нижнего слоев оснований, толщину слоев, требуемую плотность и модуль деформации.

Выбор машин для уплотнения зависит от типа грунта. В большинстве случаев в качестве материала для верхних и нижних слоев оснований предписывается использовать зернистые, несвязные грунты. В таких условиях чаще всего применяют гладковальцовые или пневмоколесные катки.



*Стабилизация грунта улучшает технологические свойства грунта*

и зачастую большой дальностью транспортировки щебня на рабочий объект.

Щебень обычно доставляется на объект в прицепах с задней разгрузкой и перемещается на нужный участок автогрейдером или распределителем каменных материалов. Затем материал основания распределяется и разравнивается слоями толщиной 150–250 мм (6–10 дюймов). После разравнивания материал уплотняется гладковальцовыми катками (статическими или вибрационными) или пневмоколесными катками.

**[РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УПЛОТНЕНИЮ ГРУНТА]**

Несмотря на внешнюю простоту, уплотнение грунта может оказаться одним из наиболее сложных этапов любого строительного проекта. Многие производители предлагают опциональные исполнения своих уплотняющих машин, что позволяет оператору регулировать частоту и амплитуду колебаний в соответствии с техническими условиями на ведение работ.

Не существует простого способа задать рабочие параметры катка в соответствии с уплотняемым материалом. Зачастую наилучшим выходом является метод проб и ошибок. Очевидно, что пользователю нужно выбрать каток соответствующего типоразмера (ширина вальца, масса и т. д.) для того, чтобы выполнить требования к производительности. Однако максимальное уплотняющее усилие достигается путем экспериментирования с различными параметрами, которые оператор может регулировать (частота, амплитуда и скорость укатки), с последующим анализом эксплуатационной эффективности и выполнением корректировки.

Производители делают свои машины технически все более оснащенными, что может помочь операторам довести до максимума эффективность работы. Однако даже в условиях все большего усложнения техники достижение наилучших результатов при уплотнении грунта может потребовать знания основных принципов уплотнения грунта, значимость которых подтверждает многолетний опыт строительства. Ниже приведены некоторые общие рекомендации по уплотнению грунта.

**КАКОЙ КАТОК ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ВЫБРАТЬ?**

**СВЯЗНЫЙ МАТЕРИАЛ**

*Тонкие уплотняемые слои*

Одновальцовый каток («пэдфут»)



**МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ МАТЕРИАЛ**

*Водовосприимчивый*

Одновальцовый каток с гладким вальцом или «пэдфут»



**ФРИКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ**

*(песок 0,063–2 мм/0,002–0,07 дюйма)*

*Естественный водоотвод, если содержание мелких фракций < 7 %*

Одновальцовый каток, двухвальцовый каток (тандем), пневмоколесный каток



**КРУПНОЗЕРНИСТЫЙ ЕСТЕСТВЕННЫЙ ВОДООТВОД**

*Фрикционный материал*

Одновальцовый каток, двухвальцовый каток (тандем)



**КРУПНОЗЕРНИСТЫЙ**

*(гравий 2–63 мм/0,07–2,5 дюйма)*

*Естественный водоотвод*

*Фрикционный материал*

Одновальцовый каток, двухвальцовый каток (тандем)



**МАТЕРИАЛЫ БОЛЬШОЙ КРУПНОСТИ**

*Тяжелые частицы*

Тяжелые виброплиты, тяжелый одновальцовый каток (>12,7 т)



	<b>Проницаемость</b>	<b>Опора для фундамента</b>	<b>Грунтовое основание для дорожного покрытия</b>	<b>Набухающий материал</b>	<b>Сложность уплотнения</b>
<b>Гравий</b>	Очень высокая	Отличная	Отличное	Нет	Очень низкая
<b>Песок</b>	Средняя	Хорошая	Хорошее	Нет	Низкая
<b>Пылеватый грунт</b>	Средне-низкая	Неудовлетворительная	Неудовлетворительное	В незначительной степени	Незначительная
<b>Глина</b>	Практически отсутствует	Средняя	Неудовлетворительное	Низкая	Очень высокая
<b>Органический грунт</b>	Низкая	Крайне неудовлетворительная	Неприемлемое	В незначительной степени	Очень высокая

**Единообразие толщины слоев, скорости движения и схемы укатки:** конструкция зданий и дорог зависит от грунтовых оснований, которые уплотняются не только в соответствии с техническими условиями, но и с соблюдением единообразия. Неравномерная плотность основания может привести к появлению рытин или колеи от колес на дорогах и осадке фундамента зданий. Одной из основных причин колебаний плотности грунта является использование различных типов грунтов, укладываемых друг за другом.

Поскольку различные типы грунтов уплотняются по-разному и ведут себя по-разному после уплотнения, во время строительства необходимо стремиться к использованию одинакового материала для каждого слоя. Если требуются материалы различных типов, следует стараться использовать однотипный материал для каждого слоя: нельзя использовать различные материалы в одном слое горизонтальной отсыпки. Это может иметь крайне важное значение для достижения однородного уплотнения.

Другая причина колебаний плотности – нестабильная влажность. Поскольку слишком сухой или слишком влажный грунт уплотнять сложнее, в процессе уплотнения следует всегда стремиться к обеспечению оптимальной влажности по Проктору на всем рабочем объекте. Это поможет достичь наибольшей плотности и максимального единообразия результатов.

Толщину слоев обычно контролируют не очень строго, за исключением, возможно, верхних слоев дорожных оснований под дорожным покрытием. Если все другие факторы, такие как влажность и тип материала, остаются неизменными, обеспечение постоянной толщины слоя приведет к достижению одинаковой

**Толщина слоя:** технология уплотнения постоянно совершенствуется и вносит новые изменения в процесс уплотнения. Однако, если взять даже самый совершенный каток, после равномерного уплотняющего воздействия слои материала большей толщины останутся менее плотными, чем слои меньшей толщины. Существуют исключения из этого правила, но, тем не менее, следует искать такую толщину слоя, которая оптимизирует производительность исходя из требуемой плотности и минимального числа проходов.

Состояние предшествующего слоя или лежащего ниже основания также оказывает влияние на достигаемую степень уплотнения. Если лежащий ниже слой не был тщательно уплотнен, он будет иметь сравнительно слабые участки. Уплотнение следующего слоя, в свою очередь, даст нестабильные, нежелательные



плотности на всем объекте. Несоблюдение требований в отношении толщины слоя может привести к несоответствию результатов работы техническим условиям.

Другими факторами, которые могут отрицательно влиять на качество уплотнения и которым зачастую не уделяется должного внимания, являются равномерность уплотняющего воздействия и число проходов. Такие параметры, как число проходов, скорость катка и параметры вибраций, можно легко контролировать. Технология интеллектуального уплотнения, например система контроля уплотнения Caterpillar с функцией составления карт на основе GNSS-навигации, способна обеспечить визуальную картину объекта работ для контроля равномерности его обработки и требуемого числа проходов. Однородная обработка объекта более эффективна и приносит более успешные результаты, чем беспорядочное уплотнение материала.



результаты. Каждый слой должен быть уплотнен равномерно и тщательно для того, чтобы уплотнение следующих слоев также можно было выполнить успешно.

**Уплотняющее усилие:** уплотняющее усилие— это количество энергии, переданной в грунт для того, чтобы вызвать изменение положения и уплотнение частиц грунта. Изменяя параметры машины, такие как масса, ширина, давление в шинах, амплитуда и частота колебаний, можно изменять уплотняющее усилие. Некоторые из этих параметров можно изменять, не меняя машины. Другие, такие как ширина, могут потребовать смены машины, чтобы изменить уплотняющее усилие. Для каждого отдельно взятого проекта необходимы определенные значения этих параметров.



**Рабочая скорость:** в целом, скорость движения играет важную роль в производительности строительных работ: чем быстрее машина, тем быстрее выполняется работа. Однако при использовании виброкатков, в отличие от всех других типов машин, производительность в большинстве случаев повышается при снижении скорости хода. Существует оптимальная, с экономической точки зрения, скорость, позволяющая катку обеспечить требуемое уплотнение.



**Общие правила укладки грунта и уплотнения:** ниже приведены общие правила, которые вы, ваши руководители строительных работ и операторы должны учитывать в начале каждого проекта по уплотнению.

- При укладке нового слоя грунта он должен быть распределен по всей площади равномерно. Не допускается укладка грунта, влажность которого слишком высока. Для распределения материала и придания ему соответствующего профиля используется бульдозер на малой скорости. Нельзя засыпать водонасыщенные слои новыми материалами.
- Дефекты в виде ям на поверхности или участков с видимой сегрегацией материала должны быть устранены путем добавления такого же материала с хорошо подобранным гранулометрическим составом.
- Сразу после завершения разравнивания следует начинать уплотнение грунта, перемещаясь от периферии к центру уплотняемой зоны.
- Земляное полотно/обочина также должны быть уплотнены; уплотнение обочины осуществляется от наружных краев к середине. Поверхность следует сделать гладкой и гидроизолированной.
- При работе с материалами, восприимчивыми к атмосферным осадкам, весь уложенный грунт должен иметь боковой уклон приблизительно 6 процентов, чтобы предотвращать скапливание воды на поверхности.
- В плохую погоду уплотнение каждого слоя следует осуществлять полосой, ширина которой равна ширине вальца, до полного завершения уплотнения. Затем осуществляется переход на следующую полосу, процесс повторяется, и так продолжается до завершения уплотнения всего участка. В конце рабочего дня поверхность следует сделать гладкой и гидроизолированной для предотвращения проникновения воды в грунт.
- При уплотнении нежесткого основания целесообразно использовать низкую амплитуду и высокую частоту колебаний, если жесткость основания это позволяет. Когда основание уплотняется вместе с первым слоем, следует использовать высокую амплитуду и среднюю или низкую частоту колебаний.
- Использование комбинированного – статического и вибрационного – уплотнения, при котором сначала осуществляется вибрационное, а затем статическое уплотнение, может дать наилучшие результаты.

### [ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ УПЛОТНЕНИЯ ]

Плотность была традиционным показателем количественной оценки степени уплотнения грунта в лабораторных условиях, и она же являлась исторически наиболее широко используемым показателем для определения требуемой степени уплотнения и ее измерения в полевых условиях. Лабораторные испытания (например, испытание по Проктору) определяют влажность, при которой достигается максимальная плотность. Проектная плотность в реальных условиях строительства задается в процентах относительно максимальной лабораторной плотности сухого грунта.

В большинстве случаев такая проектная плотность составляет 95 процентов плотности, определенной методом стандартного испытания по Проктору, для насыпей и достигает 100 процентов плотности, определенной методом модифицированного испытания по Проктору, для дорожных сооружений. Аналогичным образом влажность должна находиться в определенных пределах относительно оптимальной влажности, определенной в лаборатории.

На протяжении долгого времени требовалось проводить полевые испытания точечным методом, чтобы гарантировать соответствие двух важных показателей – требуемой плотности и влажности – техническим условиям на данные строительные работы. Эти испытания также позволяют судить об эффективности уплотнительной техники и используемых строительных технологий. В последнее время в качестве методов определения качества уплотнения на объектах начали получать большее признание машинные (бортовые) системы измерения уплотнения.

Многие официальные органы теперь требуют применения так называемого «интеллектуального уплотнения», которое представляет собой уплотнение с использованием машинной системы измерения уплотнения, дополненной системой составления карт, связывающей результаты измерений с координатами точек измерений на рабочем объекте, и функцией предоставления данных для последующего анализа и документирования.

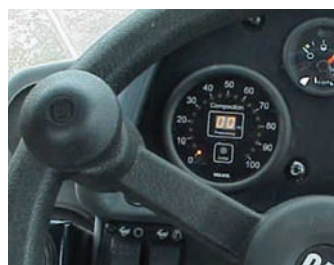
### ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ СТЕПЕНИ УПЛОТНЕНИЯ



**Давно применяемые методы**

- Технологический контроль/технические условия, регламентирующие технологию работ.
- Испытания точечным методом:
  - Радиометрический плотномер Troxler.
  - Пенетрометры.
  - Прогномеры.
  - Штампы опытного нагружения.

Сравнительно высокая точность. Как правило, замеры охватывают менее 1 % всей площади.



**Машинное измерение уплотнения**

- Акселерометр.
  - Machine Drive Power (MDP).
- Оператор получает показания жесткости или несущей способности в реальном времени. Сложность корреляции с результатами традиционно применяемых точечных методов испытаний. Нестабильность результатов измерений в определенных типах грунтов или условиях применения.



**Интеллектуальное уплотнение**

- Дополнительная возможность составления карт.
- Результаты измерения при помощи машинной системы измерения уплотнения несут больше информации за счет связи этих результатов и данных о машине с точными координатами места, где были сделаны измерения.
- Создание подробных карт, дающих визуальную картину проделанной работы.
- Предоставление данных для анализа и документирования.



Ниже приводится обзор некоторых наиболее распространенных методов. Следует помнить, что каждый метод испытаний обеспечивает измерение свойств грунта (например, плотности, прочности и т. д.) по-разному, поэтому попытки корреляции результатов различных испытаний должны осуществляться с пониманием

### Полевые методы измерений (традиционно применяемые)

*Измерения, связанные с плотностью грунта:* для измерения плотности грунта в полевых условиях используются два основных метода.

- 1. Измерение реакции грунта на радиоактивные частицы при помощи устройства под названием Troxler, или «радиометрический плотномер».** Эти устройства получили наибольшее распространение в области измерения плотности грунта в полевых условиях. Однако к их недостаткам относятся необходимость получения лицензии на использование, а также необходимость периодического контроля и испытания источника радиоактивного излучения, установленного в устройстве. Для транспортировки этих устройств часто требуется оформление документов и получение разрешения.

Устройство измеряет влажность на глубине приблизительно 50 мм (2 дюйма) и плотность на глубине 300 мм (12 дюймов) или менее, используя, соответственно, поток нейтронного и гамма-излучения, направляемого в испытываемый грунт. Испытание выполняется быстро и без повреждения материала. Наилучшие результаты достигаются в однородных грунтах.

Применяется три основных процедуры измерения плотности радиометрическим прибором: прямая передача, обратное рассеяние и использование «метода воздушного зазора».

*Метод прямой передачи* дает наилучшую точность, наименьшую погрешность состава и наименьшую погрешность неровности поверхности. Он может использоваться для измерений на глубинах в диапазоне 50–300 мм (2–12 дюймов). Наиболее важной особенностью метода прямой передачи является то, что оператор непосредственно контролирует глубину измерения.

*Метод обратного рассеяния* устраняет необходимость создания отверстия в уплотненном грунте, поскольку прибор остается на поверхности. Однако точность

этих различий. Кроме того, сама природа испытаний точечным методом предполагает, что результаты испытаний в данной точке совпадают с результатами в соседних зонах или всем объекте, где испытания не проводились.



Радиометрический плотномер Troxler

снижается, повышается погрешность состава. Этот метод дает наилучшие результаты на малых глубинах (50–75 мм/ 2–3 дюйма).

*Метод воздушного зазора* снижает погрешность состава и допускает использование в режиме прямой передачи или обратного рассеяния. Измерительный прибор поднят выше поверхности грунта, чтобы ослабить погрешность состава, но точность измерений все же хуже, чем при использовании метода прямой передачи.

Использование радиометрических приборов ограничивается необходимостью соблюдения мер предосторожности при работе с радиоактивным материалом и тем фактом, что органические грунты или материалы с высоким содержанием солей и/или радиоактивных веществ могут давать ложные показания. Вибрации грунта от строительных машин также могут быть источником ошибок при измерениях.



*Точность метода песочного конуса проверена временем*

**2. Выкапывание и взвешивание грунта с измерением объема, который занимал выкопанный грунт.** Взвешивание пробы выкопанного грунта легко осуществимо, если в наличии имеются точные весы. Измерение объема ямки, из которой извлечен грунт, сделать сложнее, но пара разработанных методов позволяет делать это с приемлемой точностью. Ниже описываются два метода:

*Метод песочного конуса (метод замещения песком):* метод песочного конуса представляет собой многоэтапную процедуру, отнимающую больше времени, чем метод использования радиометрического плотномера Troxler, но гарантирующую высокую точность. Иногда его используют в сочетании с радиометрическим методом для проверки калибровки радиометрического плотномера. Этот метод основан на измерении объема песка, требуемого для заполнения ямки, образовавшейся при извлечении пробы грунта. Песок легко высыпается в ямку и имеет однородную плотность, т. е. при переносе песка из контейнера в ямку его плотность существенно не меняется.

*Водобаллонный метод:* водобаллонный метод также называют испытанием при помощи плотномера Вашингтона. Первые три этапа испытания – выкапывание пробы, ее взвешивание и сушка – совпадают с этапами метода песочного конуса. Их выполнение позволяет определить влажность грунта.

Однако вместо измерения объема ямки при помощи песочного конуса используется плотномер Вашингтона. Этот плотномер представляет собой заполненное водой устройство, которое размещают над ямкой. В ямку помещают баллон, прикрепленный к основанию прибора. Открывают клапан, расположенный сбоку на плотномере, и нагнетают калиброванную жидкость в баллон. Баллон после заполнения принимает форму ямки. Плотномер откалиброван, что позволяет считать объем жидкости и, таким образом, узнать объем ямки.

Далее, как и в случае метода песочного конуса, путем деления массы отобранной пробы грунта на объем ямки определяют плотность (массу единицы объема влажного грунта). Массу единицы объема сухого грунта также можно вычислить путем деления массы единицы влажного грунта на влажность плюс единица.

Водобаллонный метод имеет следующие ограничения: промежуток времени, требуемый для получения результатов, и тот факт, что точность зависит от способности баллона копировать неровности стенок ямки.



*Использование динамического конусного пенетрометра*

*Измерения, связанные с прочностью грунта и жесткостью грунта: плотность грунта традиционно была тем показателем, который измеряли при уплотнении грунта для установления требований к степени уплотнения и оценки качества работ. Однако сейчас все шире используются показатели уплотнения грунта, более прямо связанные с технологическими требованиями, к числу которых чаще всего относят прочность грунта. В полевых условиях применяется несколько методов измерения прочности, некоторые из которых (не все) будут описаны в настоящем руководстве. Методы измерения прочности, используемые в полевых условиях, делятся на три категории:*

**1. Сопротивление внедрению в грунт:**

наиболее широко используемый прибор для измерения внедрения в грунт – это *динамический конусный пенетрометр (DCP)*. В этом испытании измеряется сила/энергия или сопротивление сдвигу/трению, требуемое для внедрения небольшого конуса в грунт при помощи груза постоянной массы, падающего с известной высоты. Это устройство можно использовать для определения калифорнийского показателя несущей способности в ньютонах на квадратный миллиметр (фунтах на квадратный дюйм) до глубины 1830 мм (72 дюйма). Неумелое применение падающего груза или неправильный подсчет количества ударов, а также изменение глубины проникновения за один удар (или серию ударов) могут привести к ошибкам в измерениях. Точность измерения данного

устройства в условиях каменистых грунтов также вызывает сомнения.

Обычно используется конусный наконечник с диаметром основания конуса 20 мм (3/4 дюйма) и углом конуса 60 градусов. Конусный наконечник внедряется в грунт под действием падающего груза, наносящего удар по пластине, которая передает динамическое воздействие на наконечник. Регистрируется величина внедрения в грунт на один удар. В более прочных грунтах для внедрения конусного наконечника требуется несколько ударов, регистрируется число ударов и величина внедрения в грунт.

Преимуществом динамического конусного пенетрометра является измерение прочности грунта на большую глубину по сравнению с другими методами. Глубина внедрения конусного наконечника может достигать 1 м (39 дюймов) и более, хотя трение грунта о стержень конусного пенетрометра может влиять на показания, особенно на глубине более метра. Динамический конусный пенетрометр нельзя применять на очень прочных материалах, таких как стабилизированный известью грунт по истечении времени выдерживания. Это испытание требует физических усилий, и многократное использование пенетрометра может вызывать усталость.

### 2. Ответная реакция грунта на падающий груз

**груз:** данное испытание основано на следующем принципе: чем жестче грунт, тем сильнее отскок падающего груза при падении на поверхность. Одним из устройств, использующих такой принцип измерения, является легкий дефлектометр с падающим грузом (LWD). Применяется также дефлектометр с падающим грузом (FWD), являющийся более тяжелым вариантом этого устройства.

*Легкий дефлектометр с падающим грузом (LWD)* измеряет жесткость грунта или модуль упругости поверхности конструктивных слоев при падении груза постоянной массы с известной высоты на базовую плиту, оснащенную акселерометром(-ами) и другими датчиками. Путем измерения прогиба или смещения базовой плиты можно определить динамический модуль упругости грунта, выраженный в мегапаскалях (МПа), до глубины 150 мм (6 дюймов). Необходимое условие: поверхность грунта должна быть ровной и горизонтальной. Опыт практического применения дефлектометров свидетельствует о том, что дефлектометры различных производителей показывают

разные результаты измерений для грунтов с одинаковыми параметрами.

*Дефлектометр с падающим грузом (FWD)* – это более крупная версия переносного дефлектометра, о котором речь шла выше.

Дефлектометр FWD монтируется на прицепе, и его сложнее транспортировать, но он имеет такой же принцип действия с нанесением удара по намного более крупной плите, созданием большей зоны воздействия и большей глубиной измерения. В то время как дефлектометр LWD имеет глубину измерения 150 мм (6 дюймов), более крупный дефлектометр FWD может генерировать энергию, проникающую на глубину 1 м (39 дюймов) в грунт, что ближе к ударному воздействию, создаваемому виброкатком.

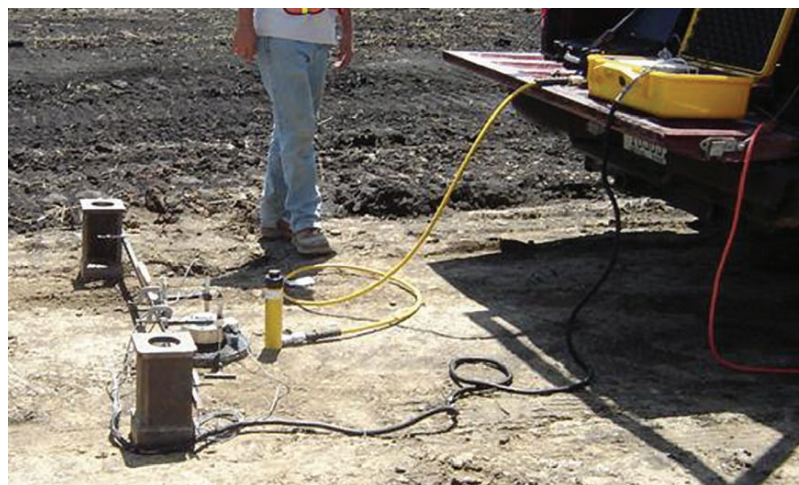


*Легкий дефлектометр с падающим грузом*

### 3. Сопротивление грунта статическому воздействию

**воздействию:** этот метод схож с методами испытаний при помощи падающего груза, поскольку обеспечивает измерение жесткости грунта с поверхности грунта, но отличается использованием статического давления вместо динамического воздействия. Поскольку цель уплотнения грунта состоит в том, чтобы сделать грунт жестким, требуется очень значительное усилие, чтобы осадить грунт статическим давлением. Для измерения жесткости грунта размер штампа должен быть приблизительно равен требуемой глубине измерения, т. е. скорее требуется штамп с диаметром, близким к 30 см (12 дюймам), чем штамп сантиметрового или дюймового размера.

*Испытание нагружением штампов:* применяется несколько установок для штамповых испытаний со штампами различных диаметров. Чем больший диаметр имеет штамп, тем большее усилие необходимо для его вдавливания в грунт на достаточную для измерения глубину. Когда штамп находится под нагрузкой, измеряют осадку под действием данного усилия, а результаты измерений записывают в виде графика. Таким образом можно определить модуль упругости (жесткость) грунта, а также его несущую способность. Для погружения в грунт штампа большого диаметра (обычно 300 мм (12 дюймов)) требуется нагрузка в несколько тысяч фунтов.



*Подготовка к штамповым испытаниям*

В качестве оборудования для создания усилия нагружения часто применяют имеющееся строительное оборудование. Измерения нагружением штампов используются напрямую при расчете толщины дорожного покрытия.



*Пробная укатка*

*Другие полевые измерения:* применяются и другие методы измерения в полевых условиях, которые определяют степень уплотнения, но не попадают в категории, упомянутые выше. Эти методы в течение многих десятилетий использовались отдельно или в сочетании с другими испытаниями для лучшей оценки способности грунта выдерживать нагрузку. Многие из них используются до сих пор.

**1. Пробная укатка:** пробная укатка широко использовалась в Северной Америке в качестве альтернативы точечным испытаниям для того, чтобы напрямую выяснить реакцию уплотненной поверхности на приложенную нагрузку. Это испытание позволяет выявить слабые места и обеспечить равномерную несущую способность. Процесс включает прокатку тяжелой машины на колесах по уплотненной поверхности и измерение глубины колеи или прогиба. Глубокие колеи свидетельствуют о неприемлемом уплотнении.

Пробная укатка является не столь прямым средством измерения прочности грунта, как некоторые упомянутые выше технологии, но, возможно, более прямым средством измерения качества уплотнения, когда уплотнение выполняется просто с целью повышения жесткости грунта для таких сооружений, как дороги и автостоянки. Если на грунтовом основании под весом нагруженного средства для пробной укатки не остается колеи, значит, оно не будет прогибаться под нагрузкой от транспортных средств, при условии что дорога имеет хороший водоотвод и сохраняет устойчивость.

Из всех традиционных методов контроля качества уплотнения пробная укатка обеспечивает наибольшую представительность контроля, позволяя при небольших затратах проверить площадь, намного большую, чем это возможно в случае точечных испытаний.

**2. Переносная печь для измерения**

**влажности грунта:** эта печь используется для измерения влажности грунта при измерениях несущей способности, осуществляемых другими устройствами. Если влажность грунта неизвестна, то измерения, выполненные с помощью других устройств, недостоверны.

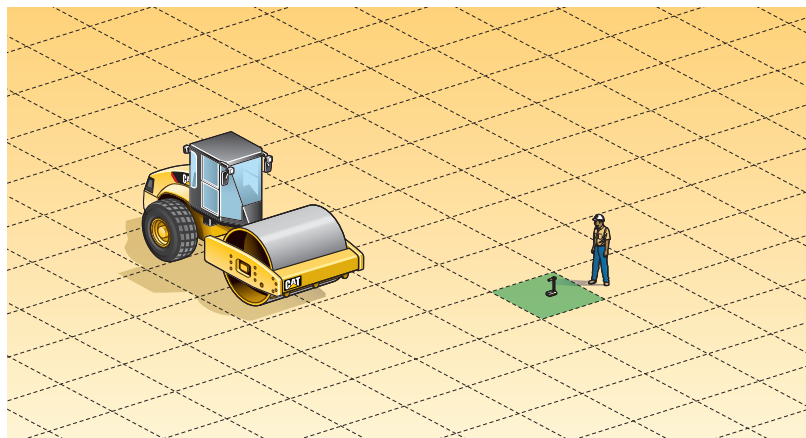


*Переносная печь для измерения влажности грунта*

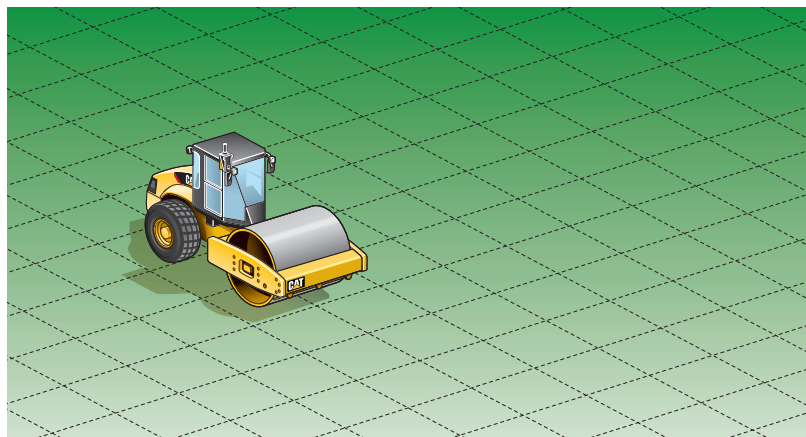
**Методы измерения уплотнения при помощи машинных систем:** традиционно уплотнение в значительной степени являлось практикой, основанной на методе проб и ошибок. Операторы, в отсутствие достоверных данных о состоянии грунта, полагаются на свой опыт и ощущения, делая вывод о том, что уплотнение завершено. Кроме того, могут использоваться технические условия на метод, регламентирующие разработанную инженерами технологию ведения работ, соблюдение которой позволяет получить удовлетворительные результаты. Затем уплотненный грунт проходит точечные испытания на определенном участке. Если результаты испытаний указывают на несоответствие требованиям, работы на данном участке возобновляются. Вместо точечных испытаний на некоторых участках применяют машины для пробной укатки в виде, как правило, тяжелонагруженного прицепа или автосамосвала. Как упоминалось выше, машина для пробной укатки буксируется через рабочий объект, и по глубине колеи от колес выявляются участки с неудовлетворительным уплотнением.

Какие бы методы проверки качества уплотнения ни использовались, операторам, разумеется, важно знать качество своей работы в процессе самой работы. Кроме того, метод проверки качества посредством точечного контроля и пробной укатки позволяет оценить лишь малую часть от общей уплотненной площади. Это не позволяет исключить возможность того, что многие участки были уплотнены недостаточно, что может привести к серьезным издержкам, если в будущем возникнут проблемы с эксплуатацией здания или дороги.

Машинные системы измерения уплотнения в корне меняют эту ситуацию за счет снабжения операторов данными о состоянии уплотнения. Прошедшие обучение операторы могут использовать машинную систему измерения уплотнения для того, чтобы определить наступление момента соответствия уплотнения техническим условиям или чтобы обнаружить проблемы, связанные с влажностью. Машинная система измерения уплотнения может предупредить их о наличии под землей таких скрытых объектов, способных повлиять на качество уплотнения, как глыбы глины, стволы деревьев или валуны.



*Традиционные системы измерения анализируют только малую часть уплотненной площади*



*Машинная система измерения уплотнения анализирует всю уплотненную площадь*



*Машинная система измерения уплотнения выдает прогноз или показатель жесткости грунта*

Что измеряет машинная система измерения уплотнения? Важно понять, что эти системы не измеряют плотность грунта, хотя термин «плотность» часто употребляется при обсуждении результатов. Из-за большого числа переменных факторов, влияющих на работы по уплотнению, эти системы не измеряют что-либо одно напрямую. Они измеряют ряд величин, позволяющих дать прогноз или оценку жесткости грунта. Как отмечалось выше, жесткость представляет собой способность грунта, имеющего определенную форму и состав, сопротивляться деформации

или прогибу под действием нагрузки. Это показатель характеризует несущую способность лучше, чем плотность материала, поскольку некоторые плотные материалы могут крошиться под нагрузкой. Материал должен обладать податливостью, но не должен ломаться.

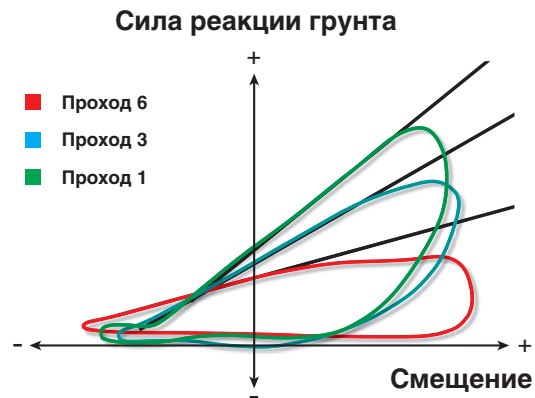
Существуют два различных вида технологий измерения: системы на основе акселерометров и системы, измеряющие энергию. Они осуществляют измерения совершенно различными способами, и, соответственно, те величины, которые они измеряют, тоже разные.

**Измерения при помощи акселерометров:**

системы на основе акселерометров выпускаются большинством производителей. В этих системах для измерения реакции грунта на удары вибрационного вальца используется установленный на вальце акселерометр. Для выполнения этих измерений применяются два различных метода.

Один метод называется методом силы-смещения. В данном методе акселерометр, установленный на оси вальца, используется для измерения величины смещения вальца. Измеряя ускорение вальца и зная параметры вальца, вибровозбудителя, общую массу катка и распределение массы между передним и задним мостом, можно вычислить силу, которую необходимо приложить к вальцу, чтобы произошло его смещение на требуемое расстояние. Чем большей жесткостью обладает грунт, тем большее усилие требуется для погружения вальца в грунт на определенную глубину. Или можно сказать, что при постоянном усилии внедрение вальца в грунт будет снижаться по мере повышения жесткости грунта. Так как площадь контакта вальца с грунтом растет по мере погружения вальца в грунт, данный метод измерения является приблизительным и не может дать точных значений.

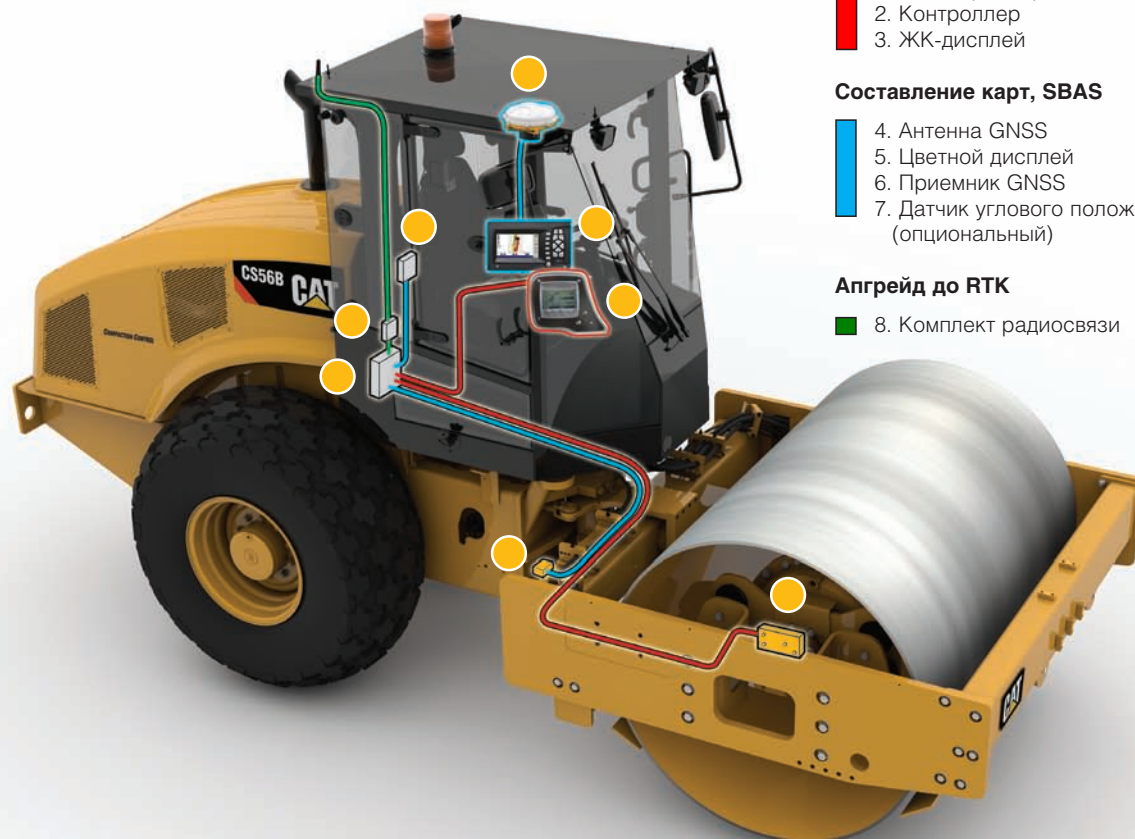
**ГРАФИК СИЛА-СМЕЩЕНИЕ**



Чем больше наклон графика, тем больше жесткость грунта.



Акселерометры измеряют реакцию грунта на удары вибрационного вальца



### Система измерения

- 1. Акселерометр
- 2. Контроллер
- 3. ЖК-дисплей

### Составление карт, SBAS

- 4. Антенна GNSS
- 5. Цветной дисплей
- 6. Приемник GNSS
- 7. Датчик углового положения (опциональный)

### Апгрейд до RTK

- 8. Комплект радиосвязи

## ТЕХНОЛОГИЯ COMPACTION METER VALUE (CMV)

Второй метод называется *Compaction Meter Value (CMV)*. Этот метод, изобретенный шведской фирмой Geodynamik в 1970-е гг., в настоящее время взят на вооружение компанией Caterpillar и некоторыми другими производителями. Вместо вычисления смещения вальца, установленный на вальце акселерометр измеряет отдачу или число G на частоте вибраций, а также измеряет число G на частоте, вдвое превышающей частоту вибраций вальца (эта частота также называется первой гармоникой). Подставив оба измеренных значения в формулу, можно рассчитать величину уплотнения, которая является показателем жесткости грунта, именуемым *Compaction Meter Value (CMV)*.

Иначе говоря, основной принцип измерения сводится к изменению динамической реакции катка по мере увеличения жесткости грунта под ним. Аналогично дефлектометру с падающим грузом, система на основе акселерометра измеряет отскок вальца катка от грунта. Для неуплотненного грунта характерно поглощение энергии вибраций, но с увеличением числа проходов по мере повышения жесткости грунта под катком энергия начинает отражаться от поверхности, а валец отскакивает более быстро при воздействии вибраций. Результаты измерения этого усиленного отскока могут быть интерпретированы как показатель уплотнения.



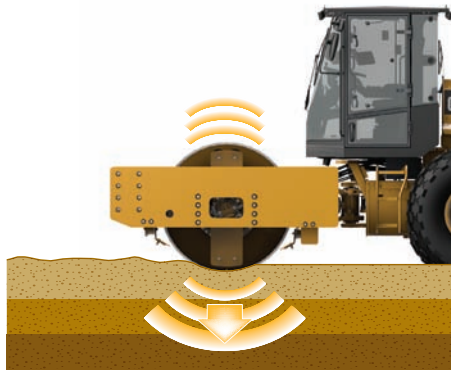
По мере повышения жесткости грунта отскок становится более явно выраженным. Когда резонансная частота грунта становится равной частоте вибраций машины, грунт достигает максимальной жесткости и утрачивает способность поглощать энергию уплотнения катка. В этот момент начинается козление машины. Независимо от применяемого метода измерения, системы на основе акселерометров отслеживают, насколько близко машина приближается к режиму козления. Такая измеряемая величина называется резонансным показателем (RMV) и используется в качестве критерия достоверности результата измерения жесткости: чем ближе машина к режиму козления, тем менее достоверен результат измерения.

Системы на основе акселерометров измеряют объем грунта на большую глубину, составляющую порядка 1–1,2 м (36–48 дюймов) в зависимости от состава грунта и характеристик катка. Такие показания усредняются, т. е. нельзя получить точные результаты измерения жесткости для какой-то конкретной глубины. Но большая глубина измерений позволяет находить скрытые под землей объекты (например, в нижнем слое основания), которые могут отрицательно повлиять на качество работы и долговечность сооружения.

Одним из недостатков систем на основе акселерометров является то, что для выполнения измерений валец должен вибрировать. Это делает системы на основе акселерометров непригодными к применению в условиях связных и полусвязных грунтов из-за демпфирующего эффекта этих материалов. Поэтому системы на основе акселерометров неэффективны при применении на катках «пэдфут» или в условиях, требующих только статического уплотнения, поскольку при отсутствии вибраций измерения невозможны.

Другим недостатком систем на основе акселерометров является глубина измерения. Как отмечалось выше, в зависимости от типа и жесткости грунта, глубина измерения может достигать 1,2 м (4 футов) и явно превышает толщину любого слоя, уплотняемого катком. Таким образом, получаемые результаты отражают усредненную жесткость нескольких слоев или жесткость грунта, включая нижний слой основания.

**ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ CMV**

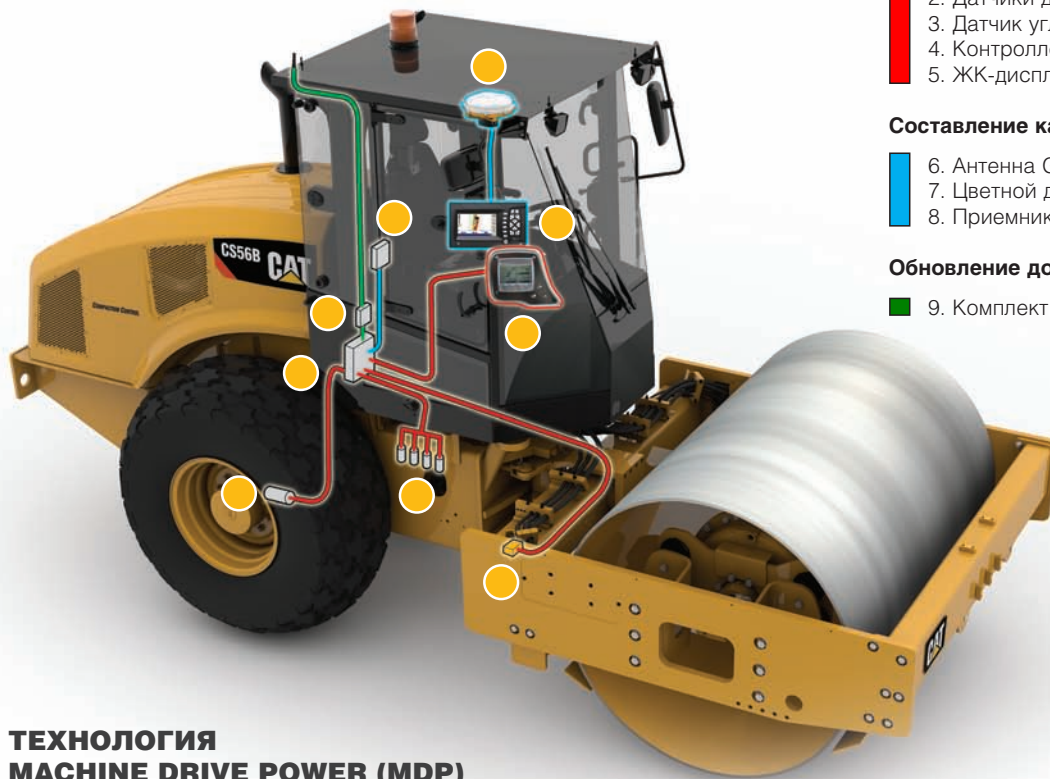


*Вибрационная энергия передается на грунт вибрационным вальцом*



*Материал вибрирует в ответ, что обнаруживается и измеряется акселерометром*

**Система CMV вычисляет теоретический показатель жесткости грунта.**



### Система измерения

1. Датчик скорости
2. Датчики давления
3. Датчик углового положения
4. Контроллер
5. ЖК-дисплей

### Составление карт, SBAS

6. Антенна GNSS
7. Цветной дисплей
8. Приемник GNSS

### Обновление до RTK

9. Комплект радиосвязи

## ТЕХНОЛОГИЯ MACHINE DRIVE POWER (MDP)

Системы на основе измерения энергии: другая применяемая сегодня технология измеряет сопротивление качению, которое приходится преодолевать грунтовому катку во время укатки грунта. Принцип технологии сводится к тому, что для преодоления сопротивления качению на рыхлом грунте требуется больше энергии, чем на плотном грунте. С увеличением числа проходов грунт уплотняется, его жесткость и несущая способность растут. По мере того как сопротивление, оказываемое материалом, постепенно снижается, каток расходует меньше энергии на движение по уплотненной территории. Таким образом, сопротивление качению и количество энергии, необходимое для преодоления этого сопротивления, можно связать с жесткостью материала. В настоящее время только компания Caterpillar предлагает технологию измерения уплотнения на основе измерения энергии. Эта технология называется Machine Drive Power (MDP).

Измерение уплотнения на основе измерения энергии имеет много преимуществ. Технология Machine Drive Power похожа на пробную укатку: чем меньше колесо погружается в грунт, тем меньше энергии затрачивается на перемещение колеса по грунту. По этой причине между результатами измерения системы MDP и глубиной колеи при пробной укатке существует тесная корреляция. Существует также тесная корреляция между

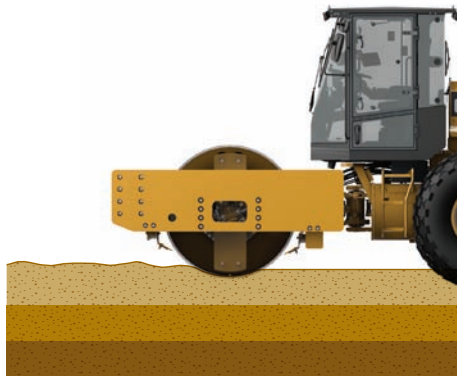
результатами измерения системы MDP и жесткостью грунта, но, возможно, главным преимуществом измерения энергии является то, что оно обеспечивает более надежное и прямое вычисление способности грунта выдерживать нагрузку. Если грунт обладает достаточной жесткостью, чтобы минимизировать передачу энергии от уплотняющей машины, тогда его прочность достаточно высока, чтобы отвечать требованиям к уплотнению грунта. Эта взаимосвязь, которая допускает измерение в случае как вибрационных, так и статических катков, лежит в основе уплотнения грунтов.

Поскольку основанный на измерении энергии метод оценки уплотнения не требует измерения вибрационной энергии для вычисления жесткости грунта, он применим ко всем типам грунтов, включая связные и несвязные грунты. Он может с таким же успехом применяться на кулачковых катках «пэдфут», как и на гладковальцовых катках. Он работает как при включенной, так и при выключенной вибрационной системе. Поэтому системы на основе измерения энергии намного более универсальны, их область применения шире, чем у систем на основе акселерометров.

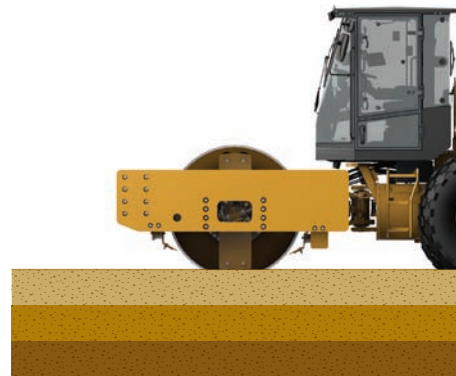
Кроме того, системы на основе измерения энергии имеют меньшую глубину измерения, чем системы на основе акселерометров. Она составляет порядка 30–60 см (12–24 дюймов) в зависимости от состава грунта и характеристик катка. Такая глубина ближе к толщине типичного слоя, и поэтому результат измерения в основном характеризует тот грунт, уплотнение которого осуществляется в данный момент, а не представляет собой среднее значение для нескольких слоев и/или нижнего слоя основания под уплотняемым слоем. Эта глубина также более сопоставима с глубиной измерения переносных испытательных устройств, что позволяет подрядчикам проверять результаты для большей достоверности.

Системам на основе измерения энергии присущи некоторые недостатки. В связи с тем, что их глубина измерения не очень велика, они не всегда способны обнаруживать скрытые объекты под землей или недостаточно уплотненные зоны нижнего слоя основания с такой же эффективностью, как системы на основе акселерометров. Еще одним недостатком является то, что в случае использования систем на основе измерения энергии при включенной вибрационной системе оператор не может получать данные, предупреждающие о приближении машины к режиму козления.

### ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ MDP



*Для движения по мягкому грунту требуется больше энергии*



*Для движения по жесткому грунту требуется меньше энергии*

**Система MDP измеряет энергию, затрачиваемую на преодоление сопротивления качению, что является более надежным и прямым способом измерения жесткости грунта.**

#### **Факторы, влияющие на результаты машинной системы измерения уплотнения:**

как отмечалось выше, вибрационное уплотнение – это сложный процесс с большим числом факторов, влияющих на общее уплотняющее воздействие, необходимое для достижения требуемой степени уплотнения/плотности. Применение технологии машинного измерения уплотнения дает результаты, охватывающие 100 процентов уплотненной поверхности, в отличие от менее чем 1 процента при использовании традиционных методов испытаний с помощью переносных устройств. Это дает оператору возможность выявления плохо уплотненных участков или твердых мест и исправления ситуации, что обеспечивает более однородные конечные результаты и более высокое качество.

Существует ряд факторов, влияющих на показания машинной системы измерения уплотнения и их корреляцию с результатами известных полевых испытаний независимо от используемой машинной технологии. Для полной реализации возможностей машинной системы измерения уплотнения необходимо понимать влияние каждого фактора. Зная, каким образом каждый фактор влияет на результаты измерения, подрядчик сможет получить достаточно надежные данные с минимальным отклонением. Для этого полезно иметь общее понимание трех основных факторов:

- Надлежащая подготовка объекта испытания.
- Метод испытаний и сбор данных.
- Параметры машины.

### Подготовка объекта испытания

Надлежащая подготовка объекта испытания и строгий контроль состояния материала для испытаний крайне важны. Несоблюдение требований к однородности материала и однородности уплотнения применительно к условиям подстилающего слоя и сырьевым материалам может напрямую повлиять на качество и точность результатов испытаний.

#### 1. Сооружение верхнего или нижнего слоя основания из различных материалов:

для возведения основания дорожной одежды или подстилающего слоя часто используются разнотипные материалы. Например, твердое основание из щебня может примыкать к основанию, выполненному из относительно мягкой глины. После укладки сверху толстого слоя гравия – толщиной, возможно, 1 м (39 дюймов) – значение показателя CMV, измеренное над основанием из щебня, будет значительно выше измеренного над основанием из глины. При этом результаты измерений, выполненных с помощью переносных приборов, не будут сильно отличаться в обоих случаях, поскольку глубина измерения этих приборов невелика. Жесткость основания оказывает ярко выраженный эффект на показания систем на основе акселерометров, но может ограниченно влиять и на показания систем на основе измерения энергии.

Чем большей прочностью обладает верхний или нижний слой основания, тем лучше поддаются уплотнению уложенные на них слои, достигая большей степени уплотнения. В связи с этим специалисты компании Caterpillar рекомендуют сначала составить карту состояния самого нижнего уровня разработанного грунта или выполнить пробную укатку, чтобы определить его состояние, и лишь затем укладывать сверху и уплотнять новый материал. Возможно, придется устранять недостатки некоторых участков, которые оказались значительно тверже или мягче большинства участков данного объекта. Однородность уплотнения – это цель, к которой необходимо стремиться. Но достижение этой цели требует наличия



Подготовка объекта для испытания

однородно уплотненного верхнего слоя основания или нижнего слоя основания с однородной несущей способностью.

#### 2. Тип грунта: тип уплотняемого грунта оказывает большое влияние на результаты измерения показателя CMV или MDP.

Причина кроется в большом различии коэффициентов упругости и коэффициентов демпфирования, которыми обладают мелкозернистые и крупнозернистые грунты. Это влияет на реакцию грунтов на вибрационное воздействие, что в свою очередь оказывает влияние на процесс измерения.

#### 3. Влажность: любое уплотнение, проводимое для испытания или в рабочем режиме, следует осуществлять, предварительно убедившись в том, что грунтовые условия приемлемы. Не рекомендуется проводить испытание на влажной «губке» или насыщенном водой материале. Влажность грунта является переменным фактором с огромным влиянием на результаты уплотнения. На рабочем объекте приходится регулярно решать вопросы, связанные с влажностью. Различия во влажности также являются главной причиной колебания показаний CMV для одного и того же типа грунта. У подрядчика есть некоторые возможности для регулирования влажности грунта. При необходимости он может повысить влажность, поливая грунт водой из автоцистерн и перемешивая ее с грунтом. Он также может понизить влажность путем разрыхляющей обработки грунта. Каждый тип грунта обладает своей оптимальной влажностью, при которой уплотнение происходит наиболее эффективно. Для песчаных грунтов оптимальная влажность составляет 4–12 процентов, а для глинистых – 9–22 процента.



Влияние влажности на показания машинной системы измерения уплотнения (показания, характеризующие жесткость грунта) связано с тем, в какой степени вода заполняет пустоты между частицами грунта. Если эти пустоты в основном заполнены воздухом, сжимаемость воздуха снижает показания. Наоборот, если пустоты содержат меньше воздуха, чем воды, которая практически не подвержена сжатию, то показания оказываются выше. При превышении определенного значения влажности грунта вода начинает действовать как смазка, создавая условия для скольжения частиц грунта друг относительно друга. В этом случае измеренное значение показателя CMV снова понижается.

Одним из преимуществ применения машинной системы измерения уплотнения

является возможность косвенного определения влажности грунта по его уплотняемости. Например, по мере высыхания грунта катку для достижения требуемой степени уплотнения зернистого грунта будет требоваться все большее количество проходов: чем ниже влажность, тем большее количество проходов необходимо совершить. Оператор может установить это по дисплею и вызвать автоцистерну с водой для обработки сухих зон. При уплотнении грунтов с высокой влажностью вода под действием уплотняющего усилия катка может вытесняться с нижних слоев грунта в верхние, что приводит к снижению показаний. Оператор может вызвать машину для вспашки грунта с целью испарения влаги.

**4. Скрытые под землей объекты:** в процессе уплотнения слоя грунта, кажущегося однородным, иногда может произойти локальное значительное отклонение показаний машинной системы измерения уплотнения (в сторону увеличения или уменьшения) по сравнению с окружающей территорией. В таких случаях, в первую очередь, можно попытаться найти причину с помощью измерительного оборудования, осуществляющего считывание с поверхности, такого как радиометрический плотномер или легкий дефлектометр с падающим грузом. Такая проверка редко дает такое же отклонение в показаниях, какое дает машинная система, поскольку глубина измерения этих типов устройств разная.

Наиболее вероятной причиной, вызвавшей локальное возрастание показаний машинной системы измерения уплотнения, может быть большой камень или обломок бетона, который находится в толще грунта, возможно, на глубине нескольких футов. Наиболее вероятной причиной локального снижения показаний может быть большая глыба глины или резиновые шины, которые находятся внутри слоя зернистых материалов. Обнаруженные изменения показаний уплотнения грунта отражают реальную картину, но для выяснения того, какой именно объект находится под землей, требуется сделать выемку грунта. А это не всегда оправдано с финансовой точки зрения.

До некоторой степени понять природу обнаруженной аномалии без выемки грунта можно с помощью длинного щупа или динамического конусного пенетromетра. Нужно выяснить вероятность негативного влияния данного аномального отклонения показаний степени уплотнения грунта на эксплуатационные свойства и срок службы дорожной одежды. Отклонение в несущей способности (жесткости) опорного грунта может вызвать напряжения в дорожном покрытии и привести к сокращению его срока службы.



**ПРЕДОСТЕРЕЖЕНИЕ:** при работе на объектах, где возможно присутствие невзорвавшихся боеприпасов под землей, перед началом разработки грунта и уплотнения рекомендуется использовать металлоискатель.

### Метод испытаний и сбор данных

#### 1. Корреляция с известной методикой

**полевых испытаний:** подрядчики, незнакомые с машинными системами измерения уплотнения, естественно, нуждаются в сопоставлении данных/результатов измерений с результатами какой-нибудь известной методики полевых испытаний для оценки уплотнения. Испытания для определения плотности при помощи радиометрического плотномера Troxler и песочного конуса в течение многих лет являлись промышленными стандартами и давали в определенной степени схожие результаты, но они служили для измерения других свойств грунта или имели другую глубину измерения, нежели машинные системы измерения уплотнения.

Используемый для определения степени уплотнения метод полевого испытания может напрямую влиять на степень корреляции с результатами машинной системы измерения уплотнения. Эффективный объем грунта, измеряемый при помощи машинной системы измерения уплотнения (CMV или MDP), значительно выше эффективного объема, измеряемого посредством типичных методов полевых измерений. Ни одно из известных устройств для полевых измерений степени уплотнения не имеет такой же глубины измерения, такого же измеряемого объема грунта и даже не измеряет таких же свойств грунта.

Благодаря портативности и сравнительной простоте использования, широкое применение находят следующие методы полевых испытаний:

- Динамический конусный пенетрометр. Отличается большей глубиной измерения, хотя измерения сопротивления сдвигу и силы трения грунта с его помощью не носят прямого характера.
- Легкий дефлектометр с падающим грузом. Эффективный объем материала, испытываемого с помощью этого устройства, составляет приблизительно 1 процент от объема, который способна измерить машинная система. Из-за разницы в объемах испытываемого материала, любая неоднородность испытываемого материала делает расхождение показаний еще более резко выраженным.

Корреляции между результатами измерения испытательных устройств и машинных систем измерения носят переменный характер в зависимости от того, какие испытания и в каком количестве выполняются. Попытки сопоставления данных испытаний при помощи машинных систем с результатами известных полевых испытаний дают наиболее удовлетворительную корреляцию при использовании испытаний нагружением больших штампов или дефлектометра с падающим грузом.

Последнее, о чем необходимо помнить при использовании машинных систем измерения уплотнения, это то, что измеряемая величина – показатель жесткости грунта – изменяется в процессе самого измерения.



Как следствие, нельзя вернуться назад и получить точно такие же показания, какие были получены при предыдущем проходе. Это может составлять проблему для агентств, пытающихся проверить результаты измерения уплотнения (CMV или MDP) при помощи каких-то других известных полевых испытаний для оценки степени уплотнения.

Полевые испытания, проводимые по завершении уплотнения при помощи переносных устройств, можно повторять, поскольку они не нарушают структуру грунта. Машина, оснащенная системой измерения уплотнения, изменяет грунт при каждом проходе из-за своего веса. Штампование является единственным видом испытания, которое оказывает аналогичное воздействие на грунт, поскольку структура самого грунта изменяется во время измерения.

Показания машинной системы измерения уплотнения все больше повторяются по мере приближения грунта к завершающей максимальной степени уплотнения. На данной стадии уплотнения грунта показания степени уплотнения почти не отличаются от прохода к проходу. Следует отметить, что при измерении степени уплотнения грунтов, обладающих хрупкой структурой, может происходить скачкообразное изменение показаний, поскольку определенная созданная структура грунта может быть разрушена во время следующего прохода катка. Это

явление называется разуплотнением и часто встречается при уплотнении зернистых грунтов.

**2. Количество регистрируемых результатов испытаний:** узкий диапазон или ограниченное количество измерений также влияют на уровень корреляции с результатами машинной системы измерения уплотнения. Для сравнения с результатами машинных систем рекомендуется использовать широкий диапазон результатов полевых испытаний, оценивающих степень уплотнения, и избегать корреляции одиночных результатов, которые не дают достаточной информации для надлежащей интерпретации.

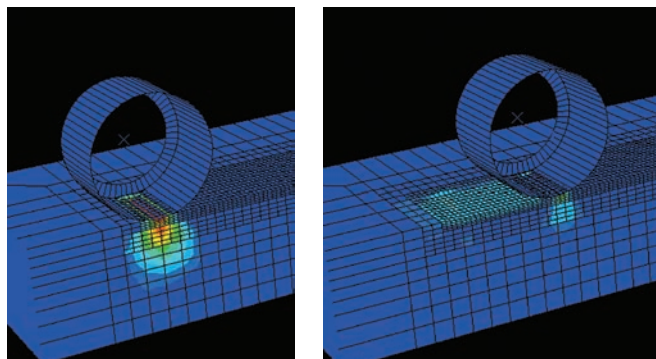
**3. Сбор данных:** неопределенность в отношении совпадения координат пар результатов измерений полевых испытаний и машинной системы измерения уплотнения может привести к расхождениям и неудовлетворительной корреляции. Рекомендуется быть особенно внимательными при сопоставлении пар результатов или использовать каток с возможностью составления карт/сбора данных при помощи спутниковой системы навигации GNSS, для того чтобы связать данные о положении катка на объекте с соответствующими полевыми испытаниями.

### Параметры машины

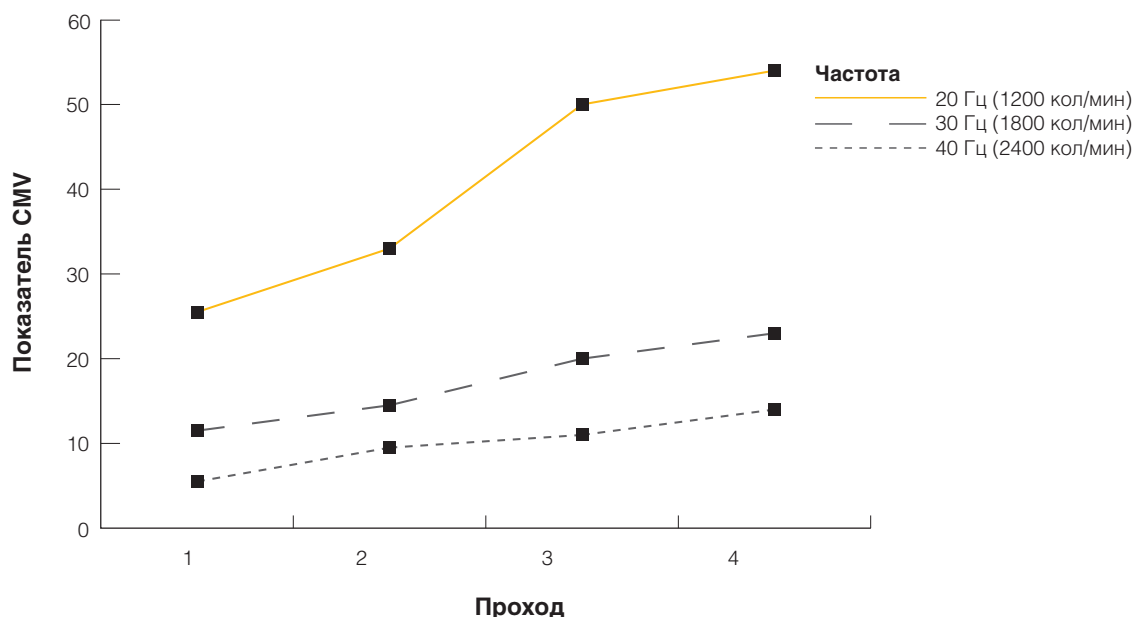
Из анализа конструкции, а также опыта эксплуатации известно, что машинные системы измерения уплотнения чувствительны к определенным рабочим параметрам машины. Понимание того, что измеряет система, позволяет легче увидеть, как неправильное применение некоторых из этих факторов может привести к получению недостоверных результатов.

**1. Амплитуда:** если задана высокая амплитуда вальца, вибрация вальца передается глубже в грунт. Такая глубина проникновения вибрации изменяет показания машинной системы измерения уплотнения, поскольку измеряемый объем грунта становится больше. Кроме того, возрастает вероятность обнаружения грунта другой структуры и типа глубже в земле.

Для получения информации об изменении грунтов глубоко в земле необходимо использовать высокую амплитуду вибрации вальца. Если интерес вызывают только верхние слои грунта, рекомендуется низкая амплитуда вибрации вальца. Даже при низкой амплитуде глубина измерения может составлять метр и более для показателя CMV.



Высокая амплитуда передается глубже в грунт



**2. Частота:** система контроля уплотнения Caterpillar определяет показатель степени уплотнения CMV по соотношению амплитуды на частоте вибрации вальца и измеряемой амплитуды ответной реакции грунта на удвоенной частоте вибрации вальца. Изменение настройки частоты вибрации грунтового катка приводит к изменению результатов измерения, даже если жесткость грунта остается неизменной. На грунте определенной жесткости показания CMV будут несколько выше при измерении в условиях низкой частоты вибрации и несколько ниже при измерении в условиях высокой частоты вибрации. Причины данного явления носят сложный характер и связаны с отношением собственной частоты вибрации грунта к частоте вибрации вальца.

На этом графике показано, как изменение частоты влияет на показания CMV. Если изменяется только частота вибрации, а все остальные параметры катка и грунта остаются неизменными (например, рабочая скорость, амплитуда, тип грунта и т. д.), то значение показателя CMV для каждой новой частоты будет существенно отличаться. Выбираемая частота вибрации влияет на показания CMV. Данная закономерность не зависит от жесткости грунта.

**3. Скорость движения:** на показания машинной системы измерения уплотнения в некоторой степени влияет скорость движения машины. В большинстве случаев более низкая скорость повышает контакт вибрационного вальца с грунтом, обеспечивая более быстрый набор жесткости грунта и уплотнение грунта на более значительную глубину, что снижает число проходов и общие затраты времени на достижение требуемой степени

уплотнения. Судя по получаемым данным, более высокая скорость движения машины в большинстве случаев снижает показания CMV, но также может повышать показания MDP. Вывести точное количественное выражение этой тенденции сложно из-за изменений типа грунта, влажности и других факторов, скрывающих суть проблемы во время испытания.

Если для достижения окончательного уровня уплотнения (определяется жесткостью грунта) необходимо выполнить несколько проходов катком, то наиболее эффективно это будет сделано на медленной скорости, когда вибрация глубоко проникает в грунт под вальцом. Более низкая скорость позволяет вибрационному вальцу уменьшить шаг нанесения ударов и увеличить число ударов на единицу пройденного пути, снижая тем самым число проходов и общие затраты времени на достижение требуемой степени уплотнения.

Кроме этого имеет место экономия топлива: за два прохода на малой скорости каток расходует меньше топлива, чем за шесть проходов, выполненных на высокой скорости. Общее правило, основанное на практическом опыте: двигаться на низкой скорости для быстрого уплотнения грунта и достижения максимальной эффективности, но не настолько медленно, чтобы допускать возникновения козления или разуплотнения. На катках с машинной системой измерения уплотнения рекомендуется поддерживать постоянную скорость 1–2,5 км/ч (0,62–1,5 мили/ч) на каменной наброске и глине и 2–5 км/ч (1,2–3,1 мили/ч) на песке и гравии. Помочь в поддержании такого режима может автоматическая система регулирования скорости, устанавливаемая на катках Cat серии В.



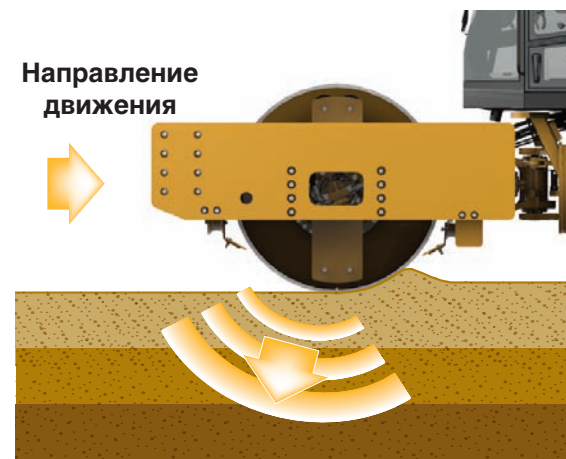
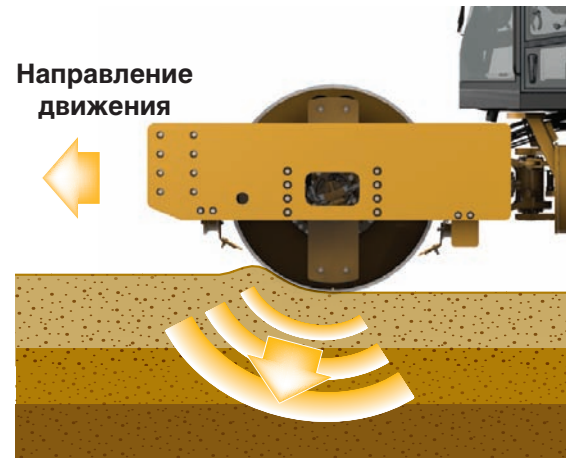
**4. Направление движения:** направление движения (передний или задний ход) влияет на показания машинной системы измерения уплотнения, регистрируемые на грунте однородной жесткости. Разница значений, измеренных при движении вперед и назад, обычно составляет от 5 % до 20 %, причем наибольшая разница наблюдается при измерении степени уплотнения чрезвычайно рыхлых грунтов.

Различия в показаниях машинной системы измерения уплотнения в зависимости от направления движения связаны с тем, что вращение дебаланса внутри вальца приводит либо к увеличению, либо к снижению результирующего крутящего момента, воздействующего на валец при движении по грунту (также свое влияние оказывают распределение весовой нагрузки, расположение колес впереди/позади вальца и другие факторы). Крутящий момент влияет на направление эффективного действия вибрации на грунт, в результате чего валец воспринимает степень уплотнения грунта со смещением к уже уплотненному участку или со смещением к рыхлому грунту, который еще предстоит уплотнить.

**5. Состояние вибровозбудителя:** включение системы вибровозбуждения также может влиять на показания машинной системы измерения уплотнения. Это влияние может быть или не быть значительным в зависимости от материала. При получении результатов испытаний технологии, позволяющие осуществлять измерение с выключенным вибровозбудителем, дают более надежные результаты в связи с уменьшением числа факторов, влияющих на результаты измерения. Технологии на основе измерения энергии, такие как MDP, позволяют это делать.

**6. Козление или двойной скачок:** при возрастании жесткости грунта собственная или резонансная частота колебаний грунта приближается к частоте вибрации вальца. Когда собственная частота колебаний грунта и частота вибраций барабана совпадают, барабан начинает полностью отскакивать от поверхности грунта с частотой, соответствующей половине частоты вибрации барабана, и измеряемый резонансный показатель RMV возрастает. Показатель RMV просто характеризует степень козления вальца. Чем больше козление машины, тем меньше достоверность показаний CMV.

**НАПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ**



*Когда направление момента вращения дебаланса совпадает с направлением движения (верхний рисунок), результирующий момент вращения, приложенный к вальцу, определяет направление регистрации реакции грунта акселерометром под некоторым углом. Когда направление момента вращения дебаланса не совпадает с направлением движения (нижний рисунок), результирующий момент вращения изменяется и изменяет угол, под которым осуществляются измерения. Таким образом, значения показателя CMV, измеренные при движении передним и задним ходом, существенно различаются.*

### [ПОРЯДОК ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАШИННЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ УПЛОТНЕНИЯ]

Катки для уплотнения грунта, оснащенные машинными системами измерения уплотнения, обладают способностью измерения факторов, дающих оператору, который находится в кабине, информацию о жесткости грунта в реальном времени. Существует много переменных факторов, влияющих на эффективность этого метода и стабильность результатов измерений. Поэтому результаты измерений часто проверяются с использованием одного из методов, упомянутых ранее, или другого портативного оборудования для испытаний. По мере повышения технического уровня систем понимание правил их использования улучшается и результаты становятся более приемлемыми.

Машинные системы измерения уплотнения обычно применяются в двух режимах: продуктивном режиме и контрольном режиме.

**Продуктивный режим:** продуктивный режим работы используется на начальном этапе процесса уплотнения. Его цель – как можно быстрее и эффективнее выполнить уплотнение максимально возможного количества грунта до приемлемой степени уплотнения. При работе в продуктивном режиме машинная система измерения уплотнения передает оператору в реальном масштабе времени информацию о жесткости грунта, а также выявляет места, имеющие неудовлетворительное уплотнение и, возможно, требующие дополнительной обработки для доведения плотности до нормы.

В данном режиме работы применяют, как правило, высокую амплитуду и грунт уплотняется только до номинального требуемого значения. Оператор следит за информацией на дисплее, чтобы видеть, какие участки достаточно уплотнены. Основной задачей оператора является эффективное выполнение работы и уплотнение до необходимого уровня как можно большего количества материала. При этом необходимо следить, чтобы не произошло чрезмерного уплотнения участков, которые уже имеют достаточную прочность. Поскольку машина работает в режиме высокой амплитуды,

местами может возникать козление. Из-за влияния всех переменных факторов: скорости движения машины, направления, козления и изменений влажности грунта – показания машинной системы измерения уплотнения в этом режиме работы обычно имеют разброс, превышающий реальное значение. Это можно рассматривать как грубый подход к измерению уплотнения, и недостаток точных или имеющих меньший разброс данных на этих участках не имеет важного значения на данном этапе.

**Контрольный режим:** после завершения уплотнения в продуктивном режиме система измерения уплотнения может быть использована для проверки качества выполненной работы в контрольном режиме. Точность в этом режиме, как правило, выше, чем в продуктивном режиме работы. Много переменных факторов, включая скорость и направление движения, сохраняются постоянными. Это позволяет исключить влияние этих факторов на результаты измерения.

Контрольный режим используется по требованию органов, контролирующих подрядчика, для предоставления на месте данных, точно характеризующих жесткость грунта на определенном этапе строительства или определенном участке. Данная процедура может систематически повторяться в ходе строительства через определенные промежутки времени, когда это удобно, для прохода катка по уже завершенной фазе проекта.

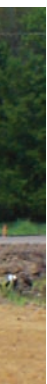
Для достижения высокой точности результатов измерения оператор должен стараться сохранять неизменными все переменные факторы, насколько это возможно. Данный режим может рассматриваться в качестве высокоточной фазы уплотнения грунта.



**РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ПОРЯДОК КОНТРОЛЬНОЙ УКАТКИ**

1. Отметить колышками участок рабочего объекта, подлежащий контролю, и составить схему укатки таким образом, чтобы в процессе проверки уплотнения каток мог двигаться передним ходом.
  2. Выбрать скорость движения катка в диапазоне от 2,5 до 4 км/ч (от 1,5 до 2,5 миль/ч), которую можно будет поддерживать. Лучше выбрать более низкую скорость, а использование системы автоматического контроля скорости оптимизирует поддержание постоянной скорости, что улучшит процесс измерения данных и уплотнение.
  3. Задать низкую амплитуду. Это снизит вероятность козления вальца и позволит выполнять измерение без глубокого проникновения вальца в грунт. Благодаря такой настройке, корреляция с результатами других методов измерения упростится.
  4. Включить вибровозбудитель (или, если применяется система MDP, не включать его) и начать движение передним ходом для измерения уплотнения, сохраняя постоянными скорость движения, амплитуду и частоту.
  5. Каждый последующий проход должен примыкать к предыдущему или немного перекрывать его. Зоны в конце проходов или места разворота должны быть уплотнены с перекрытием. *Примечание: зоны, где имело место перекрытие, могут рассматриваться как зоны, по которым совершено несколько проходов, что может привести к расхождениям в зарегистрированных данных.*
  6. Ручной сбор данных может быть весьма трудозатратным и требует максимально точного определения положения на рабочем объекте в пределах участков, отмеченных колышками. Большинство машинных систем измерения уплотнения не имеют функции автоматического сохранения данных
- при отсутствии опциональной системы GNSS (GPS). Следует, воспользовавшись электронными таблицами, такими как Excel, отсортировать данные по направлениям движения, чтобы использовать для анализа только данные, зарегистрированные при движении передним ходом. Все места, которые представляется достаточно важным проверить повторно или результаты контроля по которым требуется сопоставить с результатами известного метода измерения уплотнения в полевых условиях, следует физически отметить.
7. Для улучшения качества необходимо измерить влажность грунта, разбив весь уплотненный и измеренный участок на квадраты. Размер стороны квадрата выбирают в соответствии с размером объекта или по согласованию с подрядчиком. Полученная информация служит в качестве дополнительной при анализе степени уплотнения, а разбивка на квадраты позволяет построить карту изобар содержания влаги в грунте. Брать пробы грунта для измерения влажности следует как можно скорее после того, как каток завершит работу на участке.
  8. Просмотреть данные, зарегистрированные вручную, и выбрать участки, которые необходимо подвергнуть проверке с помощью оборудования для измерения плотности грунта. Среди выбранных участков должны быть участки с повышенной степенью уплотнения, пониженной степенью уплотнения и средней степенью уплотнения. При этом в каждую из этих трех категорий должно входить по несколько участков.
  9. Провести корреляционные испытания в ранее отмеченных местах. Нельзя аппроксимировать результаты, поскольку грунтовые условия могут значительно отличаться даже на небольшом расстоянии.

**ПРИМЕЧАНИЕ:** для того чтобы реализовать весь потенциал машинной технологии измерения уплотнения, необходимо наличие функций составления карт уплотнения на основе навигационной системы GNSS (GPS), что обеспечит регистрацию всех данных с привязкой к положению, где они были получены на рабочем объекте. Более подробную информацию по этому вопросу можно найти в разделе «Интеллектуальное уплотнение» настоящего руководства.



### **Обобщающие выводы в отношении машинных систем измерения уплотнения:**

В любом проекте выполнения уплотнительных работ качество и стоимость являются главным объектом внимания. Достижение требуемой степени уплотнения рациональным и экономичным способом имеет крайне важное значение. Существует большое количество технических условий и традиционно применяемых методов измерения уплотнения в полевых условиях. Появление машинных методов измерения уплотнения предоставило в распоряжение операторов улучшенные инструменты, которые обеспечат максимально возможное качество уплотнения при минимально возможных затратах.

Машинное измерение уплотнения – это превосходная технология при надлежащем применении, которой, однако, свойственны свои ограничения. Машинная система измерения уплотнения не может дать информацию о типе уплотняемого грунта, влажности грунта или его физических характеристиках.

Машинная система измерения уплотнения измеряет реакцию грунта, чтобы сделать моментальный «снимок» несущей способности. При правильной настройке и управлении вибрационный грунтовый каток с системой измерения уплотнения предоставляет информацию, которую оператор не мог бы получить иным способом. Опытный оператор, используя полученную информацию, может самостоятельно определить состояние грунта. Эти данные характеризуют жесткость грунта, хотя и не дают гарантии из-за наличия слишком большого количества переменных факторов. Тем не менее, опытный оператор способен понять, какую информацию несут в себе результаты измерений и что ему необходимо делать. Используемые процессы зачастую более важны, чем технология сама по себе.





## Раздел 5 ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПЛОТНЕНИЕ

Интеллектуальное уплотнение является новейшим техническим достижением в области вибрационных катков для уплотнения грунта. Ранее возможность точного измерения степени уплотнения, привязки результатов измерения к координатам, определенным при помощи системы GNSS, отображения этих результатов на карте объекта на мониторе перед оператором, записи и сохранения данных для документирования казалась чем-то нереальным. Только время покажет, какие технические инновации будут внедрены в будущем. Компания Caterpillar будет оставаться в авангарде этой дискуссии и сделанных открытий.

### [ ЧТО ТАКОЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПЛОТНЕНИЕ? ]

С недавнего прошлого под интеллектуальным уплотнением подразумеваются системы измерения уплотнения, установленные на вибрационных катках для уплотнения грунта. Различные правительственные учреждения и различные производители дорожно-строительной техники дают разные определения интеллектуального уплотнения грунта. В общем случае интеллектуальное уплотнение может быть определено как применяемая на катках в процессе уплотнения технология, которая позволяет повысить эффективность ведения работ на объекте за счет устранения работы наугад. Эта технология обеспечивает операторов в реальном масштабе времени информацией об уплотнении, которая помогает им определить, что степень уплотнения продолжает повышаться и/или уплотнение завершено.

Исходя из этого определения, можно сказать, что описанная выше машинная система измерения уплотнения действительно является разновидностью систем интеллектуального уплотнения. Такие системы на катках для уплотнения грунта в реальном масштабе времени передают данные об уплотнении на объекте, открывая оператору и руководителям работ на объекте доступ к информации, которой они ранее не обладали.

Более сложные системы способны также выводить данные на виде в плане для отображения выполненной работы и сохранять данные для последующего анализа.

Один пример ранней конкретизации для Министерства транспорта (США):

#### **Интеллектуальное уплотнение (IC)**

Процесс измерения и регистрации времени, местоположения и параметров уплотнения несвязных грунтов во время уплотнения с помощью виброкатка, оснащенного измерительной системой

на базе акселерометра и глобальной системой определения местоположения (GPS).

Теперь они также имеют отдельное определение или требование к тому, что собой представляет интеллектуальный каток:

#### **Каток с системой интеллектуального уплотнения (IC)**

Виброкаток, оснащенный измерительной системой на базе акселерометра, **способный регистрировать измеренные значения параметров уплотнения.**

В то же время Федеральное управление автомобильных дорог США (FHWA) описывает интеллектуальное уплотнение следующим образом:

**Интеллектуальное уплотнение (IC)** – это уплотнение дорожных материалов, таких как грунт, минеральные материалы или асфальтобетонная смесь с использованием современных вибрационных катков, оснащенных встроенной системой измерений, **системой сбора информации на базе бортового компьютера, системой составления карт при помощи глобальной системы определения местоположения (GPS)** и опциональной системой управления с обратной связью. Катки с системой интеллектуального уплотнения осуществляют контроль уплотнения в реальном масштабе времени и своевременное внесение корректировок в процесс уплотнения за счет объединения систем измерения, **документирования** и управления. Катки с системой интеллектуального уплотнения осуществляют в непрерывном режиме составление карт с условной расцветкой, на которых пользователь может видеть точное местонахождение катка, число проходов катка и результаты измерения прочности материала.

Европейский Союз также предпринимал попытки дать определение использованию интеллектуального уплотнения. В своей брошюре «Руководство по оценке грунтовых и асфальтовых катков, оснащенных системой непрерывного управления уплотнением (ССС)» Комитет по европейскому строительному оборудованию (CECE) приводит таблицу для классификации оборудования с технологиями непрерывного управления уплотнением. (см. Приложение.)





Важно отметить, что в более поздних определениях интеллектуального уплотнения упоминаются не только функции встроенных средств измерения результатов уплотнения и их вывода в реальном масштабе времени на дисплей перед оператором, но и функции регистрации и сохранения в памяти данных о местоположении для документирования, дальнейшего анализа и хранения документации. Само по себе определение интеллектуального уплотнения непрерывно эволюционирует.

В компании Caterpillar верят, что интеллектуальный каток должен уметь измерять степень уплотнения грунта, соотносить результаты измерений с координатами, определенными при помощи системы GNSS, отображать карту измерений на дисплее, вести запись поступающих данных и документировать результаты работы. Перечисленные выше функции позволяют экономить время и деньги всем, включая операторов катков, подрядчиков, владельцев объекта. Поэтому современное определение интеллектуального уплотнения, используемое компанией Caterpillar, выглядит следующим образом:

**Интеллектуальное уплотнение (IC) Система, осуществляющая измерение уплотнения грунта, выводящая результаты измерения на дисплей, ведущая запись данных и составление карт уплотнения с помощью спутниковой системы картографирования GNSS, а также осуществляющая управление катком или направляющая работу катка в соответствии с показаниями системы измерения.**

Данное определение относится как к виброкаткам, так и к статическим каткам и не требует обязательного наличия на катке системы измерения на основе акселерометра. Ранее упоминавшаяся технология MDP – это новая технология, обладающая рядом преимуществ по сравнению с технологией измерения уплотнения на основе акселерометра в зависимости от условий применения.

Далее в этом руководстве интеллектуальное уплотнение упоминается только в отношении катков, оснащенных интегрированными системами измерения результатов уплотнения (CMV или MDP), документирования результатов и составления карт с возможностью регистрации и сохранения данных для документирования и последующего анализа вне машины.

#### **Определение координат катка на рабочем объекте**

Машинная технология измерения уплотнения может быть дополнена технологией Всемирной навигационной спутниковой системы (GNSS), позволяющей определять точные координаты машины на объекте при помощи различных космических спутников. Технология GNSS



широко доступна и обеспечивает возможность использования различных уровней точности, некоторые из которых требуют наличия внешней инфраструктуры, предоставляющей корректирующие данные.

При таком уровне точности результаты, получаемые от системы измерения уплотнения, теперь можно связать с физическим местонахождением машины на объекте и вывести полученные данные на плане объекта, отображающем в том числе количество проходов, направление движения машины и многие другие параметры машины.

Независимо от того, какая машинная технология измерения уплотнения используется, система выдает в реальном масштабе времени результаты измерения грунта, уплотняемого в любой конкретный момент времени. Дополнительные функции составления видов в плане, записи результатов измерения и их вывода на виде в плане с точной привязкой к месту делают информацию намного более полезной.

*Принцип определения координат машины*  
Системы составления карт используют Глобальную навигационную спутниковую систему (GNSS) для выдачи координат каждого зарегистрированного результата измерения. В систему GNSS входят система GPS (контролируемая Министерством обороны США) и система ГЛОНАСС (контролируемая российскими государственными органами), а также другие системы, ввод в строй которых ожидается в будущем, включая Galileo в ЕС и Compass в Китае.

## УПЛОТНЕНИЕ

Местонахождение наносится на карту путем геометрических построений на основе известного положения спутников из этих систем. Спутниковые системы не обладают достаточной степенью точности для применения на практике без определенной коррекции. Системы картирования на катках для уплотнения грунта используют вспомогательные коррекционные системы для внесения поправок в сигналы спутников и обеспечения требуемой степени точности. Преимущественно применяется два вида таких систем: SBAS и RTK.

В большинстве случаев для корректировки сигналов спутников используется спутниковая система дифференциальной коррекции SBAS. Система SBAS содержит большое количество наземных станций, формирующих «реперные точки» с точно известными координатами, для определения поправок. Система SBAS обычно обеспечивает точность до 1 м (3 футов) и не требует наличия инфраструктуры вне машины.

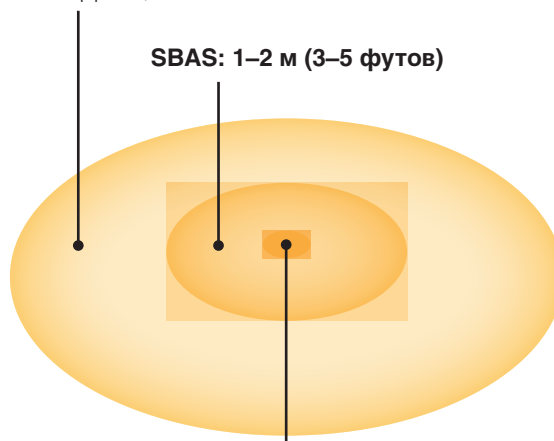
В качестве альтернативы многие производители могут корректировать сигнал при помощи технологии RTK (кинематика в реальном времени). Эта технология требует использования местных базовых радиостанций для получения корректирующих данных.

Фактически современный уровень технического развития позволяет использовать технологию RTK без снижения точности через сотовый телефон, модем или даже виртуальные базовые станции (VRS), но это требует более сложной организации и поддержки в области информационных технологий. Базовые станции являются дорогостоящим оборудованием, и для использования технологии необходимо, чтобы приемник на катке находился на линии прямой видимости от стационарной или переносной

## ТОЧНОСТЬ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

**Автономная работа: 10 м (30 футов) без коррекции**

**SBAS: 1–2 м (3–5 футов)**



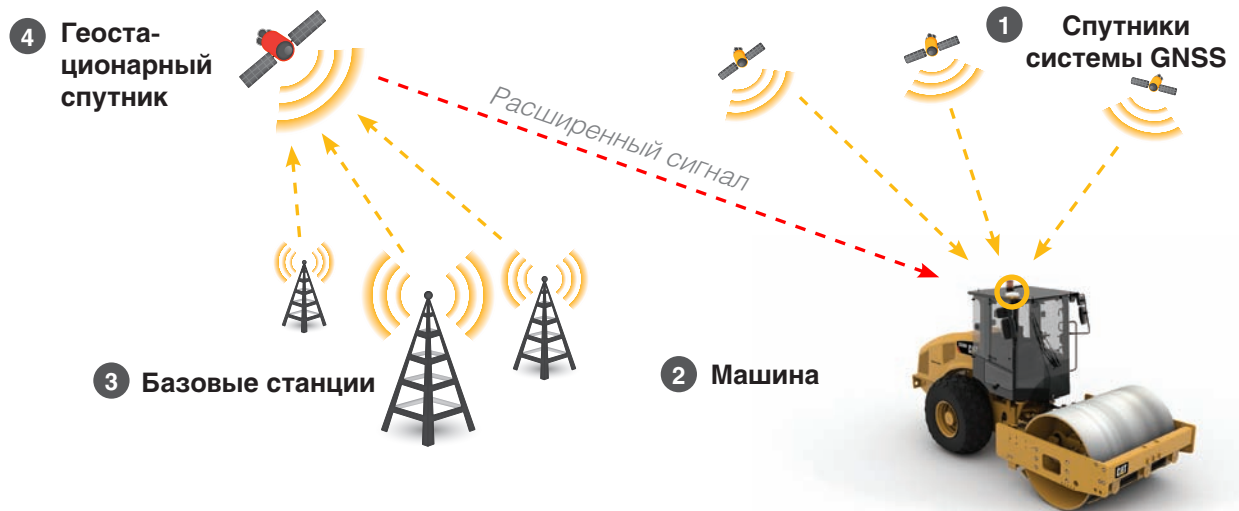
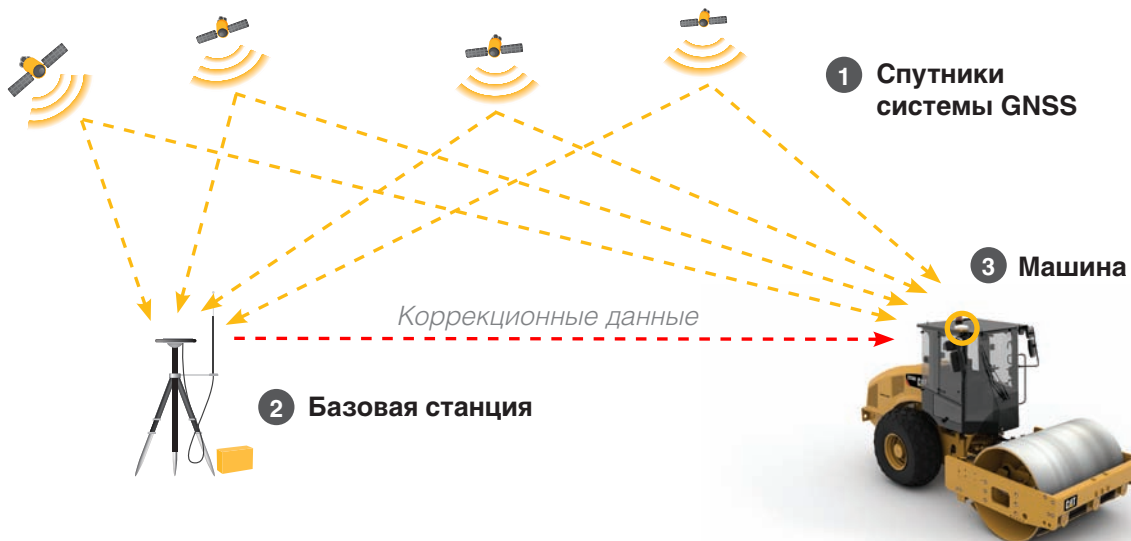
**RTK: 1 см (0,4 дюйма) в плане, 2 см (0,8 дюйма) по высоте**  
(с местной базовой станцией или станцией VRS)

базовой станции. Однако технология RTK обеспечивает более высокую точность, чем система SBAS, достигающую нескольких сантиметров (дюймов). Кроме того, она позволяет системе регистрировать данные о высоте расположения, благодаря чему на виде в плане, составляемом на катке, может быть также отображена высота.

Это дает существенное преимущество, поскольку каток, часто являющийся последней машиной, используемой на объекте ведения земляных работ, может сберечь много денежных средств/времени в ходе завершающего нивелирования.

## АВТОНОМНАЯ РАБОТА



**SBAS (СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ)****RTK (КИНЕМАТИКА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ)****Преимущества получения данных о положении**

Сама по себе машинная система измерения уплотнения способна давать большое количество информации о состоянии уплотнения в реальном масштабе времени; но эта информация очень специфична и представляет собой мгновенный снимок ситуации. Данные о положении позволяют системе выдавать не только одиночные результаты измерения в момент выполнения такого измерения, но сразу ВСЕ результаты измерений в контексте места их выполнения. Таким образом, место мгновенного результата занимает полная картина и открываются возможности для углубленного анализа. Оператор – как и руководство объекта – может сразу оценить качество уплотнения на всем объекте в целом, а не просто получить результат для отдельного момента времени.

Такая возможность является важным отличительной чертой систем интеллектуального

уплотнения по сравнению с другими методами испытаний. Традиционно персонал, работающий на земле, выполняет испытания для контроля качества в нескольких местах, используя переносное испытательное оборудование. Этот процесс отнимает много времени и средств. Результаты испытаний используются для вынесения суждения о площади, значительно большей, чем та, где действительно были проведены испытания. Обычно соотношение составляет 1 к 1 миллиону, что не дает статистической достоверности. Система интеллектуального уплотнения позволяет снять замеры со всего объекта прямо во время его укладки.

Кроме того, некоторые системы способны импортировать трехмерные изображения инженерных или архитектурных конструкций на бортовой дисплей. Такая функция полезна на объектах, где уже применяется профилирование без установки колышков или где отсутствуют нивелировочные колышки и другие вехи.

### Использование собранных данных

Нетрудно понять, какие преимущества дает дополнительная информация оператору, позволяя выполнить качественное уплотнение объекта более эффективно и экономично. Многие органы надзора и управления дорогами требуют регистрации базовых данных в реальном масштабе времени в полевых условиях. Это данные в текстовой форме, документирующие базовый ход уплотнения при помощи принтерного устройства в кабине. Однако многие официальные органы сейчас делают акцент на более подробные отчеты, составляемые вне машины. Это требует передачи всех зарегистрированных данных об уплотнении с машины, находящейся на объекте, на ПК в офисе. Передача данных может осуществляться вручную при помощи флеш-карты или беспроводным способом с использованием соответствующего аппаратного и программного обеспечения для такой связи.

После передачи всех данных на офисный компьютер пользователи могут отфильтровать

### ИНТЕРФЕЙС VISIONLINK



или отсортировать данные, требуемые органами дорожного надзора и управления для отчетной строительной документации. В настоящее время существует большое количество программных продуктов, помогающих в решении таких задач, включая AccuGrade Office, SiteVision Office, VisionLink, Veda и многие другие. Эти программные продукты отличаются диапазоном форматов файлов, возможностями и ценой.

### [ ПРЕИМУЩЕСТВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ ]

**Документирование для контроля и гарантии качества:** интеллектуальное уплотнение дает возможность осуществлять документирование выполненных работ. Кроме этого, оно позволяет осуществлять активный контроль с возможностью отслеживания достигнутого прогресса ежедневно или в близком к реальному масштабу времени, а также обеспечивает возможность электронного сохранения и анализа результатов, которые можно соотносить с долговременными или прежними записями данных на объекте.

**Повышение производительности труда оператора:** объем выполненной работы визуально отображается для оператора, помогая установить достижение грунтом требуемой жесткости. Таким образом, оператор в реальном масштабе времени получает данные, в соответствии с которыми он может действовать в дальнейшем.

Например, система может поставить оператора в известность о слабо уплотненных местах, выявить возможные проблемы с влажностью, а в условиях применения высокоточной системы RTK каток может контролировать уклоны и высотные отметки на объекте при завершении работ.

**Повышение эффективности работ на объекте:** вывод результатов в виде карты всей уплотняемой зоны, позволяющей выявить места, нуждающиеся в уплотнении или уже уплотненные. Это позволяет минимизировать число проходов и расход топлива, а также быстро снизить количество выполняемых вручную испытаний для определения степени уплотнения на объекте, сохраняя производительность на постоянном уровне и снижая расходы на испытания за счет уменьшения числа образцов, которые маркируются и направляются на хранение.

**Уверенность в результатах:** высокоточное определение местоположения позволяет на ранней стадии строительного процесса точно выявить места, где уплотнение вызывает проблемы, более эффективно исправить ситуацию и снизить риск повторных работ в дальнейшем. Данные предоставляются в наглядном и понятном виде, позволяющем надежно оценивать качество работ в целом. Благодаря этому, опытные операторы могут делать уверенный вывод о завершении работы и сразу переходить на другой участок, а не дожидаться результатов обычных испытаний.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ



## [АКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПЛОТНЕНИЕ]

Интеллектуальное уплотнение грунта получило широкое распространение, когда государственные учреждения изучили и признали преимущества технологии и разработали технические условия на ее использование. Технические условия помогают обеспечить применение технологии таким образом, чтобы это давало приемлемый результат для учреждения, разработавшего условия.

Федеральное управление автомобильных дорог США (FHWA) разработало перечень общих технических условий для использования систем интеллектуального уплотнения при уплотнении грунтов. Эти технические условия предназначены для департаментов транспорта штатов, которые могут использовать их без внесения изменений или модифицировать применительно к своим требованиям. Ниже приведен пример технических условий в исходном виде:

Катки с системами интеллектуального уплотнения должны отвечать следующим требованиям:

1. Катки с системами интеллектуального уплотнения должны представлять собой самоходные одновальцовые вибрационные катки, оснащенные акселерометром, установленным на вальце или около вальца для измерения взаимодействия между катком и уплотняемым материалом с целью оценки приложенного уплотняющего воздействия. Катки с системами интеллектуального уплотнения могут быть гладковальцовыми и кулачковыми (пэдфут) катками.
2. Величина, измеряемая катком, так называемый результат измерения интеллектуального уплотнения (IC-MV), характеризует жесткость материалов, определяемую по вибрации вальца катка и ответной реакции уплотняемого материала.

3. Приемник радиосигнала GPS должен быть установлен на каждом катке с интеллектуальной системой уплотнения, для того чтобы отслеживать положение вальца и число проходов катка.
4. Катки с системами интеллектуального уплотнения должны включать бортовую систему документирования, способную выводить на экран в реальном масштабе времени карты с условной расцветкой, отображающие результаты измерения системы интеллектуального уплотнения, включая жесткость материала (по его реакции), местонахождение катка, число проходов катка, скорость катка, частоту и амплитуду колебаний вальца.
5. Модуль дисплея должен иметь разъем USB для переноса данных.
6. Бортовой принтер, способный распечатывать идентифицирующие данные катка, дату измерений, строительную площадь, охваченную картой, процентную долю строительной площади, охваченной картой, требуемое значение показателя IC-MV и зоны, не отвечающие требуемому значению показателя IC-MV. (Принтер применяется дополнительно по выбору департамента транспорта каждого штата.)

Государственные учреждения других стран разработали свои собственные технические условия, регламентирующие процесс дорожного строительства в этих странах. Несмотря на отличие от технических условий FHWA, они преследуют ту же цель – установление стандарта для использования оборудования.

## УПЛОТНЕНИЕ

Технические характеристики	Оборудование	Размеры поля	Требования к месту	Документация
Миннесота/ Министерство транспорта (США)	Гладковальцовый или кулачковый (пэдфут) вибрационный каток (25 000 фунтов).	Не менее 100 м x 10 м (в основании). Макс. толщина – 1,2 м.	Одна калибровочная/ контрольная полоса на каждый тип или источник зернистого материала.	Уплотнение, жесткость, влажность, операции по контролю качества и действия по устранению нарушений (еженедельный отчет).
ISSMGE (Международное общество специалистов по механике грунтов и инженеров- геотехнологов)  www.issmge.org/	Каток, выбранный на основании опыта.	100 м, умноженные на ширину рабочего объекта.	Однородная, ровная поверхность. Перекрытие соседних проходов ≤ 10 % ширины вальца.	Схема укатки, последовательность уплотняющих и измерительных проходов; амплитуда, скорость, результаты динамических измерений, частота, случаи возникновения козления и соответствующие местоположения.
Земляные работы (Австрия)	Рекомендуются виброкатки с резиновыми колесами и гладким вальцом.	100 м в длину, умноженные на ширину рабочего объекта.	Отсутствие неоднородностей вблизи поверхности (материалов или влажности). Перекрытие соседних проходов ≤ 10 % ширины вальца.	План осуществления уплотнения, последовательность уплотняющих и измерительных проходов, амплитуда, частота, скорость, результаты динамических измерений, случаи возникновения козления и соответствующие местоположения.
Общество исследований дорог и дорожного движения (Германия)	Рекомендуются самоходные катки с резиновыми колесами; допустимы прицепные вибрационные катки с буксирующей машиной.	Каждая калибровочная зона должна охватывать, по крайней мере 3 частичных поля ~ 20 м длиной.	Ровная и лишенная грязи. Однородность по типу грунта, влажности, толщине слоя и несущей способности опорных слоев. Перекрытие соседних проходов ≤ 10 % ширины машины.	Результаты динамических измерений; частота; скорость; работа в режиме козления; амплитуда; расстояние; время измерения; тип катка; тип грунта; влажность; толщина слоя; дата, время, название файла или регистрационный номер; погодные условия; положение пробных проходов и направление укатки; абсолютная высота или положение; местные условия и насыпи по границам; параметры машины и выявленные отклонения.
Vägverket (Швеция)	Вибрационный или осцилляционный одновальцовый каток. Мин. линейная нагрузка – 15–30 кН.	Толщина наиболее толстого слоя – 0,2–0,6 м.	Слой должен быть однородным и непромерзшим. Защитные слои толщиной < 0,5 м могут уплотняться с нижним слоем дорожного основания.	–

Требования к уплотнению	Скорость передвижения	Частота
90 % результатов измерения уплотнения катком и среднее значение результатов измерения модуля при помощи легкого прогибомера с падающим грузом (на основании 3 испытаний) должны достигать 90 % требуемых значений, установленных на калибровочной полосе.	Одинаковая во время калибровочного и рабочего уплотнения	
Коэффициент корреляции $\geq 0,7$ . Минимальное значение $\geq 95$ % значения $E_{v1}$ и среднее значение $\geq 105$ % (или $\geq 100$ % в режиме козления). Результаты динамических измерений ниже установленного минимума имеют место на протяжении $\leq 10$ % прохода. Измеренный минимум должен составлять $\geq 80$ % предписанного минимума. Среднеквадратическое отклонение (среднего значения) должно составлять $\leq 20$ % за один проход.	Постоянная 2–6 км/ч ( $\pm 0,2$ км/ч)	Постоянная ( $\pm 2$ Гц)
Коэффициент корреляции $\geq 0,7$ . Минимальное значение $\geq 95$ % значения $E_{v1}$ и среднее значение $\geq 105$ % (или $\geq 100$ % в режиме козления). Результаты динамических измерений ниже установленного минимума имеют место на протяжении $\leq 10$ % прохода. Измеренный минимум должен составлять $\geq 80$ % установленного минимума. Измеренный максимум в работе не должен превышать установленного максимума (150 % определенного минимума). Среднеквадратическое отклонение (среднего значения) должно составлять $\leq 20$ % за один проход.	Постоянная 2–6 км/ч ( $\pm 0,2$ км/ч)	Постоянная ( $\pm 2$ Гц)
Коэффициент корреляции по результатам регрессивного анализа должен быть $\geq 0,7$ . Результаты динамических измерений на отдельных изолированных участках (с шириной вальца катка) должны отличаться от результатов на соседних участках не более чем на 10%, чтобы участки были пригодными к калибровке.	Постоянная	
Необходимо соблюдение требований к несущей способности или степени уплотнения. Среднее значение степени уплотнения для двух контрольных точек $\geq 89$ % для земляного полотна под дорожным основанием и защитных слоев толщиной более 0,5 м; среднее значение $\geq 90$ % для дорожного основания. Требуемое среднее значение для двух отношений несущей способности изменяется в зависимости от типа слоя.		Постоянная 2,5–4,0 км/ч

### [ ПРАВИЛА ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ ]

Подобно рассмотренным выше каткам, оснащенным только машинными системами измерения уплотнения, вибрационные катки для уплотнения грунта с системами интеллектуального уплотнения требуют соблюдения аналогичных процессов с небольшими отличиями, обусловленными дополнительными возможностями, которыми обладают эти технически более сложные системы. Применяются два режима работы: продуктивный режим и контрольный режим.

*Продуктивный режим:* как упоминалось выше, этот режим работы служит для того, чтобы как можно быстрее и эффективнее выполнить уплотнение максимально возможного количества грунта передним и задним ходом до достижения номинальной требуемой степени уплотнения. Уплотнение выполняется с нормальными рабочими параметрами: диапазон скорости хода составляет 1–2,5 км/ч (0,6–1,6 миль/ч) на каменных набросках и глинах; 2–5 км/ч (1,2–3,1 миль/ч) на несвязных песчаных и пылеватых грунтах; амплитуда колебаний обычно устанавливается на максимум.

Для катка с системой интеллектуального уплотнения оператор может получать информацию не просто в виде безразмерного показателя, характеризующего жесткость или несущую способность грунта. Благодаря наличию дополнительного цветного дисплея и функций сбора и сохранения данных, оператор видит моментальный «снимок» уплотнения точно в месте нахождения катка и может контролировать ход работ на объекте по числу проходов, достигнутому

значению степени уплотнения в процентах от требуемой степени уплотнения или даже по изменению в процентах степени уплотнения от прохода к проходу (как для участков с достаточным уплотнением, так и для участков с неудовлетворительным уплотнением). При необходимости оператор может цифровым способом отметить точки и участки, требующие доработки для доведения степени уплотнения до проектных условий. Все сохраненные данные могут быть при необходимости экспортированы для просмотра, фильтрации и анализа.

В этом режиме работы система составления карт позволяет оператору визуально контролировать ход уплотнения и дает средний уровень гарантии качества. Но из-за большого числа переменных величин – скорость движения, направление движения, козление, колебания влажности грунта – качество собранной в этом режиме информации по уплотнению будет все же ниже максимально достижимого. Тем не менее, эта информация позволяет оператору максимально повысить эффективность ведения работ и стабильность уплотнения, а также исключить работу на основании догадок в процессе уплотнения.

Когда значения достигают диапазона, близкого к требуемому значению, оператор может перевести каток на новый участок, а персонал, отвечающий за контроль качества, проведет испытания, чтобы убедиться в соответствии участка проектному заданию или в том, что участок может быть использован для прохода в контрольном режиме.





*Контрольный режим:* после завершения уплотнения в продуктивном режиме система измерения уплотнения может быть использована для проверки качества выполненной работы в этом более точном режиме. Этот подход целесообразен в тех случаях, когда заказчик требует документацию или карту с точным отображением жесткости грунта для конкретной фазы строительства.

В этом режиме наиболее важно обеспечить контроль и постоянство переменных параметров, и поэтому работа теперь ведется на постоянной скорости 3 км/ч (2 мили/ч) с амплитудой колебаний, имеющей низкое значение (или с отключением вибровозбудителя, если это необходимо вследствие свехуплотнения, козления или других проблем на машине,

оснащенной системой MDP). Это помогает исключить влияние этих переменных параметров на результаты измерения и данные, собираемые и сохраняемые для отчетности.

Следует также иметь в виду, что, когда речь идет о контрольном режиме, то, что вы измеряете (степень уплотнения грунта), изменяется в процессе измерения. При движении тяжелого катка его статическая масса оказывает давление и другие воздействия на грунт. Поэтому операторы должны стремиться к тому, чтобы уменьшить величину силы, воздействующей на грунт во время измерения. Способность систем, принцип действия которых основан на измерении энергии, осуществлять измерение со статическим вальцом (без вибрации) делает их идеально подходящими для этой цели.



### РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ПОРЯДОК КОНТРОЛЬНОЙ УКАТКИ

1. Составить схему укатки таким образом, чтобы в процессе составления карты уплотнения каток двигался передним ходом.
2. Выбрать скорость движения катка в диапазоне от 2,5 до 4 км/ч (от 1,5 до 2,5 миль/ч), которую можно будет поддерживать. Лучше выбрать более низкую скорость, а использование системы автоматического контроля скорости позволит обеспечить постоянство скорости, что улучшит процесс измерения данных и уплотнение.
3. Задать низкую амплитуду. Это снизит вероятность козления вальца и позволит выполнять измерение без глубокого проникновения вальца в грунт. Вероятность корреляции с результатами других методов контроля возрастет.
4. В меню дисплея выбрать функцию включения контрольного режима и включить вибровозбудитель (или использовать статический режим, если каток оснащен системой MDP), после чего начать движение передним ходом с измерением степени уплотнения при постоянной скорости, амплитуде и частоте колебаний.
5. Используя возможности Всемирной навигационной спутниковой системы (GNSS), корректировать направление движения катка таким образом, чтобы обеспечить единственный проход по требуемому участку. Каждый последующий проход должен примыкать к предыдущему или немного перекрывать его. Зоны в конце проходов или места разворота должны быть уплотнены с перекрытием. ПРИМЕЧАНИЕ: зоны, где имело место перекрытие, могут рассматриваться как зоны, по которым совершено несколько проходов, что может привести к расхождениям в зарегистрированных данных.
6. После завершения уплотнения всего участка выбрать функцию выключения контрольного режима на дисплее.
7. Для улучшения качества необходимо измерить влажность грунта, разбив весь уплотненный и измеренный участок на квадраты. Размер стороны квадрата выбирают в соответствии с размером объекта или по согласованию с подрядчиком. Полученная информация служит в качестве дополнительной при анализе степени уплотнения, а разбивка на квадраты позволяет построить карту изобар содержания влаги в грунте. Брать пробы грунта для измерения влажности следует как можно скорее после того, как каток завершит работу на участке.
8. Просмотреть составленную карту степени уплотнения и выбрать участки, которые желательно подвергнуть проверке на соответствие с помощью другого оборудования для измерения степени уплотнения. Среди выбранных участков должны быть участки с повышенной степенью уплотнения, пониженной степенью уплотнения и средней степенью уплотнения. При этом в каждую из этих трех категорий должно входить по несколько участков.
9. Провести проверочные испытания, используя ручной навигатор GNSS, чтобы как можно точнее определить участки, выбранные для испытания. Не допускать неточностей, поскольку параметры грунта могут значительно отличаться даже на небольшом расстоянии. (Более подробно данный вопрос рассматривается в следующем разделе, касающемся оборудования для измерения степени уплотнения грунта.)

### [ЭШЕЛОННАЯ СХЕМА УПЛОТНЕНИЯ ДВУМЯ КАТКАМИ]

Для калибровочной укатки, необходимой для достижения требуемого значения показателя уплотнения (CMV или MDP) и определения требуемого числа проходов, можно использовать несколько методов. Некоторые из этих методов рекомендуются подрядчиком и могут отличаться от тех, которые приводятся в данном

документе. В настоящее время наблюдается тенденция перехода к практике, в которой упор делается на равномерное уплотнение участка до приемлемого уровня, и отход от стремления к достижению одной конкретной степени уплотнения или плотности для всех участков объекта.

### Калибровка на объекте с использованием полосы пробного уплотнения и независимого испытательного устройства

Данный метод позволяет исключить как можно больше переменных факторов из процесса измерения, а также использовать типы грунтов и методы уплотнения, аналогичные тем, которые будут использованы при возведении дороги или строительного объекта. Метод отнимает очень много времени и ресурсов, но позволяет лучше всего понять процесс и принципы задействованных технологий.

1. Выбрать контрольный участок объекта, который может быть оставлен в нетронutom состоянии в течение всего времени проекта и который имеет тот же тип грунта, уклоны и структуру нижележащего грунта, что и большинство других участков объекта.
2. Извлечь/отсыпать грунт на контрольном участке до проектной отметки и выровнять для создания подстилающего слоя для полосы пробного уплотнения.
3. Задействовать вибрационный грунтовый каток и получить с его помощью базовую карту уплотнения, используя систему интеллектуального уплотнения в контрольном режиме при низкой амплитуде, постоянной частоте (или с выключенным вибровозбудителем для MDP), движении передним ходом с постоянной скоростью 3 км/ч (2 мили/ч).
4. Если значения степени уплотнения, отображаемые на карте, имеют большой разброс (допускается, если для 90 % всех значений отклонение от среднего значения не превышает 20 %), попробовать выполнить уплотнение подстилающего слоя с высокой амплитудой, чтобы сделать степень уплотнения слабо уплотненных участков ближе к степени уплотнения сильно уплотненных участков. Повторно выполнить операции из п. 3.
5. Если подстилающий слой равномерно уплотнен (отвечает условию: для 90 % всех значений отклонение от среднего значения не превышает 20 %), следует перейти к выполнению п. 6. В противном случае следует выбрать новую полосу пробного уплотнения (п. 1) или провести работы по устранению дефектов подстилающего слоя, позволяющие получить более равномерную карту уплотнения. Работы по устранению дефектов подстилающего слоя могут включать удаление скрытых под толщей грунта объектов, таких как камни и глиняные валуны, или стабилизацию грунта с помощью извести или другого вещества. Если на полосе пробного уплотнения было использовано стабилизирующее вещество, то это же стабилизирующее вещество должно быть применено на всем объекте, чтобы показания, полученные на полосе пробного уплотнения, обладали достоверностью.
6. Измерить степень уплотнения подстилающего слоя при помощи переносных штампов опытного нагружения или легкого прогибомера с падающим грузом в точках, равномерно расположенных по всей полосе пробного уплотнения. Не рекомендуется применять для измерений радиометрические приборы или песочные конусные плотномеры грунта, поскольку они измеряют иную характеристику грунта (плотность), чем виброкаток (жесткость). Положение точек измерения должно быть определено при помощи прецизионного навигационного GNSS-устройства, обладающего дециметровой точностью, для того чтобы обеспечить правильную привязку этих точек к карте уплотнения, составленной при помощи системы GNSS-навигации катка. В качестве альтернативы данному методу измерения можно, используя GNSS-карту, составленную при помощи катка, выбрать несколько произвольно расположенных точек с высокой, средней и низкой степенью уплотнения. Причем для каждой степени уплотнения нужно выбрать не менее трех точек (всего не менее 9 контрольных точек). Чем большее количество точек используется для измерения, тем статистически достовернее будет результат.
7. Измерить влажность в каждой контрольной точке. Если имеет место большой разброс значений влажности, корреляция не даст стабильных результатов.

**Следует отметить,** что переносные измерительные приборы, применяемые для калибровки системы измерения уплотнения катка, имеют собственную погрешность. Это означает, что при измерении характеристик одного и того же грунта с одними и теми же свойствами несколько раз результаты могут не совпадать. Например, при измерении плотности одного и того же образца грунта радиометрическим прибором можно получить результаты, отличающиеся на 15 %. Принято использовать следующую методику: снять показание, повернуть устройство на 90 градусов и снять второе показание. Среднее значение двух показаний записывается в качестве результата измерения.

## УПЛОТНЕНИЕ

8. Соотнести измеренные значения степени уплотнения со значениями, взятыми с GNSS-карты катка, и построить график, откладывая значения степени уплотнения, измеренные с помощью виброкатка, по оси Y, а значения измерений, полученные с помощью переносных полевых приборов, – по оси X. Полученный график называется графиком рассеяния.
9. Используя метод аппроксимации кривой, определите наилучшую калибровочную кривую между показаниями системы измерения уплотнения катка и показаниями, полученными методом полевых испытаний. Эта кривая далее будет использоваться только в качестве калибровочной кривой для данного типа грунта на объекте и проверок степени уплотнения подстилающего слоя.
10. Отсыпать первый слой материала и разровнять его до предписанной толщины.
11. Осуществлять укатку данного слоя до достижения равномерного уплотнения, когда при движении катка передним ходом показания системы измерения уплотнения катка перестанут сильно отличаться.
12. Повторить операции с п. 2 по п. 9 для данного слоя материала. Для этого первого слоя строится своя калибровочная кривая, которая будет использоваться для этого слоя материала по всему объекту.
13. Повторить операции по с п. 10 по п. 12 для всех отсыпанных слоев, строя для каждого слоя свою калибровочную кривую.
14. Если под влиянием погоды произойдет изменение грунтовых условий, следует повторить контрольный проход по полосе пробного уплотнения, чтобы восстановить калибровку системы измерения уплотнения катка.



### Калибровка машинной системы измерения уплотнения и определение требуемого числа проходов с использованием грунтового катка (без использования устройства для независимых полевых испытаний)

Такая (или схожая) методика используется в некоторых скандинавских странах. Она является более практичной и требует меньших затрат времени и ресурсов, обеспечивая при этом хороший контроль уплотнения без использования каких-либо других измерений степени уплотнения в качестве эталона. С помощью данной методики, используя каток, определяется номинальный максимальный уровень уплотнения материалов, которые применяются на объекте, и количество проходов, необходимое для достижения этого уровня уплотнения. Главная цель – обеспечить равномерное уплотнение по всей площади объекта. Описанный ниже порядок проведения включает устройство полосы пробного уплотнения для установления базовых данных по уплотнению. Устройство полосы пробного уплотнения не является обязательным, поскольку можно осуществить уплотнение части объекта или всего объекта, как если бы это была полоса пробного уплотнения.

1. Выбрать контрольный участок объекта, который может оставаться не затронутым строительством на протяжении всего времени проекта и который имеет такой же тип грунта, уклоны и структуру нижележащего грунта, что и большинство других участков объекта.
2. Извлечь/отсыпать грунт на контрольном участке до проектной отметки и выровнять для создания подстилающего слоя для полосы пробного уплотнения.
3. Задействовать вибрационный грунтовой каток и получить с его помощью базовую карту уплотнения (контрольную карту), используя систему интеллектуального уплотнения в контрольном режиме при низкой амплитуде, постоянной частоте (или с выключенным вибровозбудителем для системы MDP), движении передним ходом с постоянной скоростью 3 км/ч (2 мили/ч).
4. Проверить влажность грунта в нескольких местах полосы пробного уплотнения. Если влажность завышена или занижена, необходимо откорректировать ее, прежде чем выполнять дальнейшее уплотнение грунта.
5. Если значения степени уплотнения, отображаемые на карте, имеют большой разброс (допускается, если для 90 % всех значений отклонение от среднего значения не превышает 20 %), выполнить уплотнение подстилающего слоя с высокой амплитудой, чтобы показания системы измерения уплотнения стали более близкими по всей полосе пробного уплотнения. Повторно выполнить операции из п. 3.
6. После достижения одинакового уровня уплотнения для всей полосы пробного уплотнения проверить влажность в нескольких местах и записать полученные результаты.
7. Отсыпать первый слой материала. Выбрать функцию составления контрольной карты и выполнить уплотнение слоя отсыпки в режиме высокой амплитуды при низкой постоянной скорости движения 3 км/ч (2 мили/ч). Перед переходом на уплотненный материал выполняется проход передним ходом и проход задним ходом по тому же следу. Влажность должна быть равномерной и оптимальной для используемой грунтовой отсыпки или каменной наброски.
8. Повторить цикл уплотнения всего участка, отмечая по показаниям машинной измерительной системы тот уровень уплотнения, который является преобладающим для каждого прохода.



## УПЛОТНЕНИЕ

9. Путем повторения операций из п. 8 добиться состояния, когда уровень уплотнения после каждого очередного прохода будет повышаться лишь в незначительной степени или когда возникнет козление катка.
10. Среднее значение показаний, при достижении которого рост показаний прекращается, является требуемым значением показателя уплотнения, а число проходов, необходимое для достижения этого уровня уплотнения, является требуемым числом проходов.
11. Записать полученные результаты и установить на дисплее требуемое значение показателя уплотнения и соответствующее число проходов для данного слоя.
12. Повторить операции с п. 7 по п. 11 с составлением новой контрольной карты для каждого нового слоя. После завершения уплотнения всех слоев для каждого слоя будут получены требуемое значение показателя уплотнения и количество проходов.
13. Если окажется, что несколько слоев обладают почти идентичными значениями, то для этих слоев можно будет использовать одно значение требуемого показателя уплотнения.
14. Выполнить уплотнение всего объекта, соблюдая обычную технологию и используя карту уплотнения в качестве руководства для достижения равномерного уплотнения по всей площади.
15. С течением времени и по мере приобретения опыта работы в данном регионе профессиональные операторы могут научиться устанавливать требуемое значение показателя уплотнения и число проходов без использования полосы пробного уплотнения.
16. Если требуется точнее измерить уровень окончательного уплотнения, следует использовать каток в контрольном режиме (низкая амплитуда, постоянная скорость движения 3 км/ч [2 мили/ч], постоянная частота и движение только передним ходом).





#### Использование показаний системы интеллектуального уплотнения без калибровки на объекте

Эта методика является самой практичной и требует очень мало (или совсем не требует) дополнительных затрат времени. Следует иметь в виду, что эта методика наиболее применима к работе в режиме, который ранее упоминался как продуктивный режим уплотнения, и требует определенного опыта работы с системой, понимания принципа действия технологии и процесса уплотнения грунта в целом.

Суть данной методики заключается в использовании технологии интеллектуального уплотнения для сравнения относительных изменений степени уплотнения от прохода к проходу, для того чтобы узнать, когда физические возможности уплотняющего воздействия достигнут своего предела в имеющихся условиях. Как отмечалось выше, использование интеллектуального уплотнения и машинной технологии измерения уплотнения не гарантирует измерения степени уплотнения или плотности; и зачастую применяемой технологии ведения работ придается более важное значение, чем средствам и технологиям измерения, применяемым на объекте. Каток, обладающий определенными характеристиками, может стать неэффективным после выполнения определенного числа проходов по определенному материалу, делая цель, преследуемую уплотнением, недостижимой и все последующие проходы бесполезными. Знание момента наступления такого состояния весьма полезно, чтобы прекратить напрасно тратить время и топливо.

1. Выбрать оптимальный типоразмер вибрационного грунтового катка с системой интеллектуального уплотнения на основании целей уплотнения, типов грунтов, уровней влажности, толщины слоев и т. д. Выше приводились некоторые факторы, учитываемые при выборе размера и конфигурации катка.
2. Начать уплотнение на объекте, настроив дисплей системы интеллектуального уплотнения на отображение показаний уплотнения на карте и сравнивая изменение показаний от прохода к проходу в процентах.
3. Функцию составления карты можно соответствующим образом настроить, присвоив определенный цвет определенному диапазону изменения показаний от прохода к проходу в процентах. Например, для карты на дисплее можно применить настройку отображения красным цветом участков с изменением показаний от прохода к проходу на 50–100 процентов, желтым цветом – участков с изменением показаний от прохода к проходу на 10–49 процентов и, наконец, зеленым цветом – участков с изменением показаний от прохода к проходу на 0–9 процентов. Эти диапазоны можно при необходимости изменять исходя из опыта или местных условий.

## УПЛОТНЕНИЕ

4. Укатка и уплотнение продолжаются с целью окрашивания карты в зеленый цвет.
5. Наличие участков, которые не удается окрасить в зеленый цвет (небольшое изменение от прохода к проходу или отсутствие такового), указывает на какие-то проблемы с грунтом на этом участке или в подстилающем слое, которые нужно устранить.
6. Когда карта в достаточной степени окрасится в зеленый цвет и дальнейших изменений в показаниях уплотнения от прохода к проходу не будет, следует воспользоваться переносным штампом опытного нагружения или легким прогибомером с падающим грузом, как описано в примерах. Точки испытания должны быть расположены по однотипной схеме, охватывая всю уплотненную/ проверяемую площадь, или произвольно, чтобы доказать, что уплотнение отвечает или не отвечает техническим условиям на уплотнение для данного проекта.
7. Если испытания покажут, что уплотнение отвечает техническим условиям, процесс уплотнения следует продолжить на объекте, действуя таким же образом.
8. Если испытания покажут, что уплотнение не отвечает техническим условиям, это значит, что имеет место одно из двух.
  - 1) Размер и эксплуатационная масса машины не подходят для данного типа грунта и толщины слоя и/или
  - 2) влажность грунта не отвечает норме (слишком высокая или слишком низкая). В любом случае этот каток не сможет обеспечить дальнейшего повышения степени уплотнения на объекте до тех пор, пока некоторые условия не изменятся.





## [РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ, НЕ СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ОЖИДАНИЯМ]

Как отмечалось выше, существует ряд условий на рабочем объекте и эксплуатационных факторов, которые могут отрицательно влиять на результаты работы системы интеллектуального уплотнения. По мере приобретения опыта операторы катка начнут распознавать определенные характерные ситуации и понимать возможные причины отклонения от ожидаемых результатов. Ниже приведены некоторые распространенные проблемы, их причины и способы устранения. Усвоение этой информации позволит вам решать проблемы, возникающие на объекте, в кратчайшие сроки.

### **Нарушение в работе: показания системы измерения уплотнения ниже ожидаемых**

**Причина:** зернистый грунт слишком сухой для уплотнения. Дополнительные проходы приводят к разрушению структуры грунта и к разуплотнению.

**Способ устранения:** повысить влажность грунта, прежде чем продолжать уплотнение. Зернистые грунты могут поглощать большое количество воды, не становясь влажными, поскольку вода просачивается через них. Следует довести влажность до уровня, чуть выше идеального, поскольку избыток воды быстро испарится или просочится вниз.

**Причина:** грунт состоит больше из глины, чем из гравия или зернистого материала. Или, возможно, глина находится под поверхностью грунта и оказывает влияние на результаты измерений.

**Способ устранения:** удалить глину из грунта, если это возможно, или принять более низкие значения. В качестве альтернативы можно использовать машинную систему, определяющую степень уплотнения на основе измерения энергии (такую, как MDP), на показания которой не влияют связные грунты.

**Причина:** козление вальца на наиболее твердых участках. При козлении вальца показатель RMV имеет высокое значение, а значения показателя измерения уплотнения (CMV) ниже, чем должны были бы быть исходя из грунтовых условий.

**Способ устранения:** установить низкое значение амплитуды. Если козление не прекратится, уплотнение завершено. Дальнейшее уплотнение, сопровождаемое козлением, может привести к разуплотнению.

**Причина:** влажность глинистого грунта слишком высока.

**Способ устранения:** прежде чем приступить к уплотнению грунта, необходимо выполнить обработку с помощью дискового орудия, бороны или дорожной фрезы. Альтернативным вариантом является использование системы машинного измерения степени уплотнения, основанной на измерении энергии (такой, как

MDP), на показания которой не так сильно влияют связные грунты. При этом, однако, следует иметь в виду, что из-за уровня влажности надлежащее уплотнение может быть невозможным.

**Причина:** уплотняемый слой был отсыпан поверх неуплотненного или нестабилизированного грунтового основания. В результате данный слой чрезмерно прогибается и не уплотняется.

**Способ устранения:** необходимо полностью снять верхний слой и устранить дефекты слоя грунта под ним. Это может потребовать удаления избытка влаги или повторного уплотнения, ввода известки или другого вещества для стабилизации грунта. Возможно, придется полностью удалить плохой грунт и заменить его.

**Причина:** частота колебаний вальца завышена (маловероятная причина).

**Способ устранения:** для достижения наиболее стабильных результатов частота колебаний вальца должна составлять около 30 Гц (1800 кол/мин). Для установления причины несоответствия частоты колебаний норме и ее устранения необходимо воспользоваться услугами технического специалиста. В качестве альтернативы можно использовать каток с системой измерения степени уплотнения, основанной на измерении энергии (такой, как MDP), в статическом режиме (вибровозбудитель выключен) и посмотреть, отразится ли это на единообразии результатов уплотнения.

**Причина:** под землей имеется какой-то объект или объекты, жесткость которых ниже жесткости окружающего грунта, яма, в которую были зарыты деревья или иная биомасса, захороненные отходы или валун глины. На карте степени уплотнения данный объект будет выглядеть как довольно ограниченная зона.

**Способ устранения:** извлечь материалы и заменить их хорошим грунтом, если серьезность ситуации оправдывает такие меры.

**Причина:** скорость движения катка слишком высока.

**Способ устранения:** снизить скорость, чтобы повысить эффективность работы и степень уплотнения. Использовать систему автоматического контроля скорости, если таковая имеется на катке.

**Причина:** направление движения влияет на показания системы измерения степени уплотнения на катке.

**Способ устранения:** это является нормальным; показания различаются при движении передним и задним ходом. Единственный выход – двигаться только в одном направлении или учитывать показания только от одного направления во время анализа.

## УПЛОТНЕНИЕ

### **Нарушение в работе: показания системы измерения уплотнения выше ожидаемых**

**Причина:** верхний или нижний слой основания образованы более жестким типом грунта, чем ожидалось.

**Способ устранения:** все нормально.

С помощью динамического конического пенетрометра измерить сопротивление сдвигу земляного полотна. Если полученный результат превышает ожидаемое значение, следует принять его за норму.

**Причина:** под поверхностью грунта скрыт какой-то объект. Это может быть камень, бетонная плита, старое дорожное покрытие или фундамент здания.

**Способ устранения:** извлечь объект для достижения равномерного уплотнения.

**Причина:** скорость движения катка иногда слишком сильно снижается (маловероятная причина, если только оператор не осуществляет уплотнение, руководствуясь заданным количеством проходов).

**Способ устранения:** поддерживать постоянную скорость. Использовать систему автоматического контроля скорости, если таковая имеется на катке.

**Причина:** грунт мерзлый.

**Способ устранения:** отсутствует.

### **Нарушение в работе: показания системы измерения уплотнения беспорядочно изменяются**

**Причина:** имеет место реальное изменение грунтовых условий на поверхности или ниже поверхности. Такое встречается чаще, чем можно предположить. Скрытые под землей объекты, изменения материалов отсыпки и переменная влажность – все эти факторы могут влиять на показания машинной системы измерения степени уплотнения.

**Способ устранения:** если показания изменяются существенно и это должно быть устранено, следует начинать с самого простого решения. Определить и отрегулировать влажность. При необходимости извлечь из-под земли находящиеся там объекты и выполнить замену грунта.

**Причина:** показания машинной системы измерения степени уплотнения, получаемые при движении передним ходом, выше/ниже, чем при движении задним ходом.

**Способ устранения:** так и должно быть. Все зависит от типа грунта и степени его уплотнения. Как правило, по мере уплотнения грунта указанные различия постепенно нивелируются.



**Причина:** во время уплотнения возникает козление вальца. Козление может привести к широкому разбросу показаний системы измерения степени уплотнения катка, поскольку средние значения имеют тенденцию к снижению, когда валец начинает козлить на твердом грунте.

**Способ устранения:** переключиться на низкую амплитуду. Если при работе с низкой амплитудой козление не прекратится, это означает, что грунт достиг максимальной жесткости, обеспечить которую способен данный каток. В качестве альтернативы можно использовать виброкаток с системой измерения степени уплотнения, основанной на измерении энергии (такой, как MDP), в статическом режиме (вибровозбудитель выключен) и посмотреть, отразится ли это на единообразии результатов измерения уплотнения.

## [ ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ ]

Как уже отмечалось выше, измерение жесткости грунта представляет собой чрезвычайно сложную задачу из-за всех тех переменных факторов, которые связаны с этим процессом. Однако, чем больше используется интеллектуальное уплотнение, тем глубже становится понимание возможностей и недостатков этой технологии. По мере все большего ее освоения будут появляться новые технологии, такие как система Machine Drive Power, дающие дополнительные преимущества и решающие те проблемы, которые остались после последней волны прогресса. С течением времени аппаратное обеспечение существующих технологий дешевеет, становясь более доступным для переоборудования и использования в области уплотнения грунта.

Каток будущего, вероятно, будет использовать различные технологии измерения, поскольку каждая технология имеет свои полезные возможности. Появятся новые технологии измерения: возможно, это будет проникающий в грунт радар, системы формирования ультразвуковых или магнитных изображений. Станет возможным документирование с построением трехмерных изображений всей дорожной конструкции. Технологии определения влажности смогут уведомлять оператора о необходимости вызова водяной цистерны или рыхлителя. Оператор каждого катка будет иметь доступ к информации со всех машин на рабочем объекте (связь машины с машиной). Это позволит получать информацию о ходе работ на объекте в реальном времени,

реализуя преимущества получения данных от многих катков или измерительных устройств. Руководители работ смогут отслеживать обстановку на объекте и использовать данные для ежедневного принятия наиболее экономически эффективных решений.

В будущем информация будет приобретать все более важное значение. Отдельной областью разработки станут датчики для получения новых данных и возможность быстро и легко переносить данные с рабочего объекта на внешние устройства (ПК, планшеты и т. д.). Существующие технологии уже предоставляют слишком много данных, чтобы их можно было легко отсортировать удобным для сегодняшних руководителей работ и инспекторов способом. Возможность фильтрации, сортировки данных вне машины и составления отчетов о ситуации на рабочем объекте, отвечающих требованиям конечного пользователя, приобретет огромную важность и станет областью разработки многочисленных технических условий.

Наука об уплотнении вступила в интереснейшую фазу, и время покажет, какие разработки и технологии станут следующими, но одно можно утверждать с определенностью: в условиях экономии расходов, повышения качества и эффективности за счет интеллектуального уплотнения востребованность таких технологий будет все больше расти, и они будут включаться в технические условия на ведение работ во всем мире.

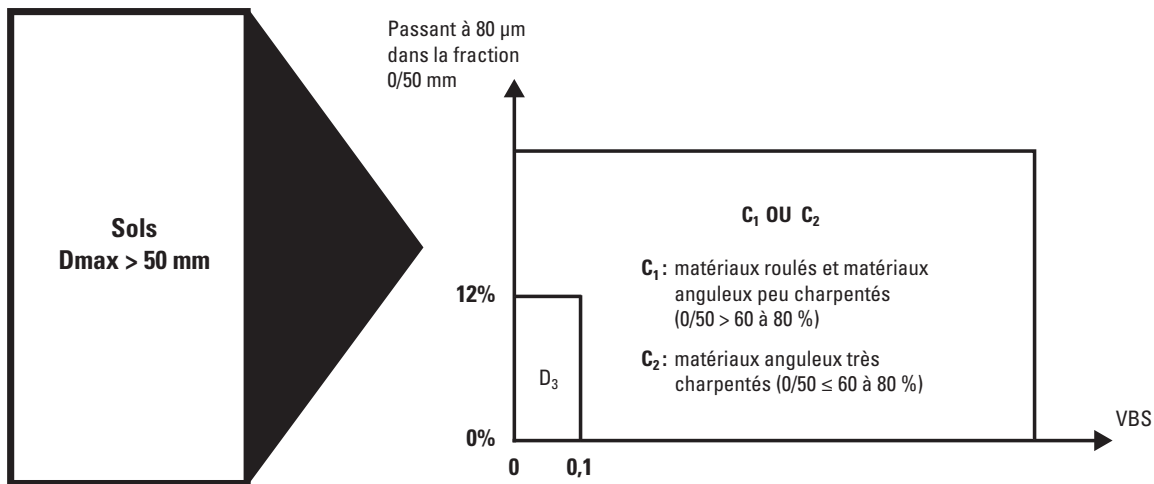
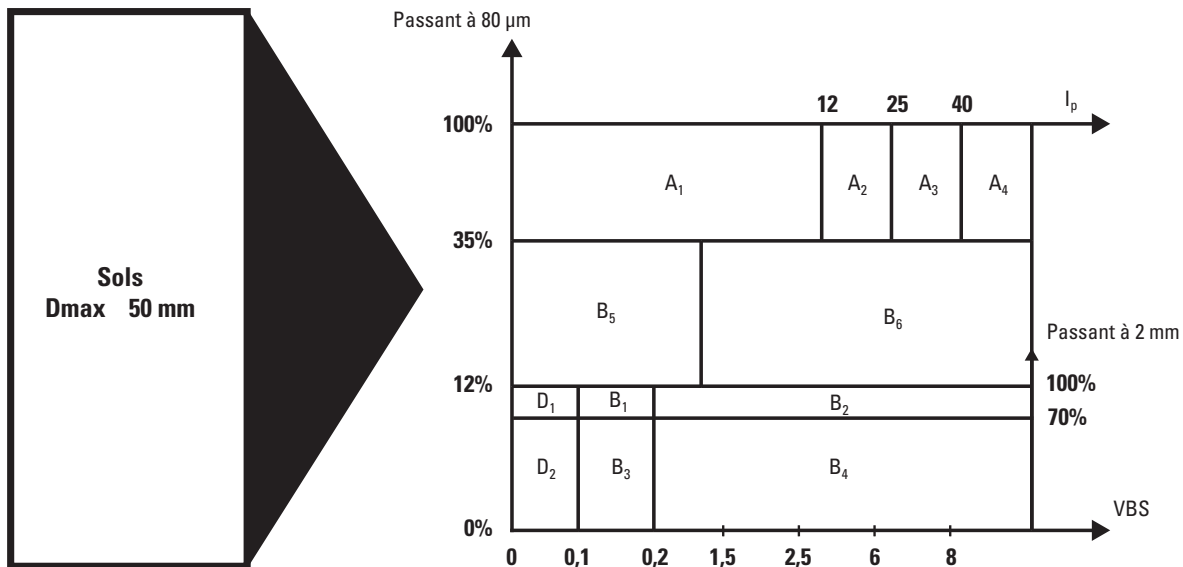
ПРИЛОЖЕНИЕ

[СИСТЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ ГРУНТОВ]

AASHTO CLASSIFICATION OF HIGHWAY SUBGRADE MATERIALS (with suggested subgroups)											
General Classification	Granular Materials (35% or less passing #200)							Silt-Clay Materials (more than 35% passing #200)			
Group Classification	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
<b>Sieve Analysis Percent Passing:</b>											
# 10	0-50										
#40	0-30	0-50	51-100								
#200	0-15	0-25	0-10	0-35	0-35	0-35	0-35	36-100	36-100	36-100	36-100
<b>Characteristics of Fraction Passing #40:</b>											
Liquid Limit				0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+
Plasticity Index	0-6		N.P.	0-10	0-10	11+	11+	0-10	0-10	11+	11+
<b>Group Index</b>	0		0	0		0-4		0-8	0-12	0-16	0-20
<b>Usual Types of Significant Constituent Materials</b>	Stone Fragments Gravel and Sand		Fine Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand				Silty Soils		Clayey Soils	
<b>General Rating as Subgrade</b>	Excellent to Good					Fair to Poor					

Система классификации грунтов AASHTO

### Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature



**Matériaux rocheux**

Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R <sub>1</sub>
		Calcaires	R <sub>2</sub>
	Roches argileuses	Marnes, argillites, pélites...	R <sub>3</sub>
	Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R <sub>4</sub>
	Roches salines	Sel gemme, gypse	R <sub>5</sub>
Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R <sub>6</sub>

**Matériaux particuliers**

Sols organiques et sous-produits industriels	F
--	---

Французская система классификации грунтов

# ПРИЛОЖЕНИЕ

Hauptgruppe	Korngrößenanteil ≤ 0,06 mm	Korngrößenanteil > 2,0 mm	Gruppe (allgemein)	Gruppe (detailliert)	Kurzzeichen Gruppensymbol
Grobkörniger Boden	≤ 5	< 40	Kies	Enggestufte Kiese	GE
				Weitgestufte Kies-Sand-Gemische	GW
				Intermittierend gestufte Kies-Sand-Gemische	GI
			Sand	Enggestufte Sande	SE
				Weitgestufte Sand-Kies-Gemische	SW
				Intermittierend gestufte Sand-Kies-Gemische	SI
Gemischtkörniger Boden	5 bis 40	< 40	Kies-Schluff	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GU
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GU*
			Kies-Ton	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GT
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	GT*
		≤ 40	Sand-Schluff	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	SU
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	SU*
			Sand-Ton	5 bis 15 Gew.-% ≤ 0,06 mm	ST
				15 bis 40 Gew.-% ≤ 0,06 mm	ST*
Feinkörniger Boden	< 40	—	Schluff	Leicht plastische Schluffe $W_L \leq 35$	UL
				Mittelpastische Schluffe $W_L = 35$ bis 50	UM
			Ton	Leicht plastische Tone $W_L \leq 35$	TL
				Mittelpastische Tone $W_L = 35$ bis 50	TM
				Ausgeprägt plastische Tone $W_L = 50$	TA
				—	—
Organogener Boden	< 40	—	Nicht brenn- und schwelbar	Organogene Schluffe $W_L = 35$ bis 50	OU
	≤ 40			Organogene Tone $W_L > 50$	OT
				Grob bis gemischtkörnige Böden mit humosen Beimengungen	OH
				Grob bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen, kieseligen Bildungen	OK
Organischer Boden	—	—	Brenn- und schwelbar	Nicht bis mäßig zersetzte Torfe	HN
				Zersetzte Torfe	HZ
				Mudden (Faulschlamm)	F
Auffüllung <sup>1</sup>	—	—	—	Auffüllung aus Fremdstoffen	A

1 - Eine Auffüllung ist eine unter menschlicher Einwirkung entstandene Schüttung aus natürlichen Böden oder Fremdstoffen.

Немецкая система классификации грунтов

USCS SOIL CLASSIFICATION SYSTEM			
SOIL FRACTION	SYMBOL	SIZE RANGE	
<b>Boulders</b>	<b>None</b>	Greater than 12"	
<b>Cobbles</b>	<b>None</b>	75 mm (3") to 12"	
<b>1- Course Grained Soils:</b>			
<b>Gravel</b>	<b>G</b>	75 mm (3") to #4 Sieve (4.25 mm)	
Course Gravel		75 mm to 19 mm	
Fine Gravel		#4 Sieve to 19 mm	
<b>Sand</b>	<b>S</b>	#4 Sieve to #200 Sieve (0.075 mm)	
Course Sand			
Medium Sand			
Fine Sand			
<b>2- Fine Grained Soils:</b>			
Fines		Less than #200 Sieve	
Silt	<b>M</b>	Use Atterberg Limits	
Clay	<b>C</b>	Use Atterberg Limits	
<b>3- Organic Soils</b>			
	<b>O</b>	Use Atterberg Limits	
<b>4- Peat</b>			
	<b>Pt</b>	Visual Identification	
<b>Gradation Symbols</b>		<b>Liquid Limit Symbols</b>	
Well-graded	<b>W</b>	High LL	<b>H</b>
Poorly-graded	<b>P</b>	Low LL	<b>L</b>

Унифицированная система классификации грунтов

SOIL GROUPS		SUB-GROUPS and in-laboratory identification							
		GROUP SYMBOL	SUB-GROUP SYMBOL	FINES % < 0.06 mm	LIQUID LIMIT				
<b>GRAVEL and SAND may be qualified sandy GRAVEL and gravelly SAND where appropriate</b>  <b>COARSE SOILS</b> less than 35% of the material is finer than 0.06 mm		<b>GRAVELS</b> More than 50% of coarse material is of gravel size (coarser than 2 mm)	Slightly silty or clayey GRAVEL	G GW GP	GW GPu CPg	0 to 5			
			Silty GRAVEL	G-F	G-M	GWM GPM	5 to 15		
			Clayey GRAVEL		G-C	GWC GPC			
			Very silty GRAVEL	GF	GM	GML, etc.	15 to 35		
			Very clayey GRAVEL		GC	GCL GCI GCH GCV GCE			
			<b>SANDS</b> More than 50% of coarse material is of sand size (finer than 2 mm)	Slightly silty or clayey SAND	S SW SP	SW SPu SPg	0 to 5		
		Silty SAND		S-F	S-M	SWM SPM	15 to 35		
		Clayey SAND			S-C	SWC SPC			
		Very silty SAND		SF	SM	SML, etc.	15 to 35		
		Very clayey SAND			SC	SCL SCI SCH SCV SCE			
		<b>FINE SOILS</b> more than 35% of the material is finer than 0.06 mm		<b>Gravelly or sandy SILTS and CLAYS</b> 35% to 65% fines	Gravelly SILT	FG MG	MLG, etc.		< 35 35 to 70 50 to 70 70 to 90 > 90
					Gravelly CLAY	CG	CLG CIG CHG CVG CEG		
				<b>Sandy SILT</b> <b>Sandy CLAY</b>	FS	MS	MLS, etc.		
			CS			CLS, etc.			
<b>SILTS and CLAYS</b> 65% to 100% fines	F		M	ML, etc.					
			C	CL CI CH CV CE	< 35 35 to 70 50 to 70 70 to 90 > 90				
<b>ORGANIC SOILS</b>			Description letter 'O' suffixed to say group or sub-group symbol		Organic matter in significant amount e.g. MHO – organic silt of high LL				
<b>PEAT</b>			Pt – consists predominantly of plant remains (fibrous or amorphous)						

### Primary Letter

G = Gravel  
S = Sand  
M = Silt  
C = Clay  
O = Organic Soil  
Pt = Peat

### Secondary Letter

W = Well graded  
P = Poorly graded  
M = With non-plastic fines  
C = With plastic fines  
L = Of low plasticity (LL < 50)  
H = Of high plasticity (LL > 50)

Classification v1.00 Sept 2010

Британская система классификации грунтов



**[ТРЕБОВАНИЯ К УПЛОТНЕНИЮ]**

Установленные на катке устройства, осуществляющие непрерывный контроль уплотнения грунта

BASIC/MINIMUM REQUIREMENTS					
One of the lower 3 blocks (one value)	At least 2 blocks	3 top blocks	Top block or 4 lower blocks	2 lower blocks	At least one block
		Time stamp	Close-loop mode		
Qualitative observation (ex: double-jump...)		Mapping on board	Actual N passes	Data post-treatment facilities, & additional information	
Dimensional bearing capacity (ex: modulus...)	Number of passes (actual vs. target value)	Automatic positioning on board 2D or 3D	Actual frequency	Result by histogram and statistics	Data exchange between machines
Dimensional (ex: stiffness...)	Relative evolution (% related to target values D or ND)	Manual positioning 2D + layer (optional)	Actual amplitude AO	Result by distance or surface	Remote data exchange
Non-dimensional value	End of compaction (D or ND)	Distance 1D	Actual speed V	Identification of machine and CCC device	Data exchange from office (USB stick)
<b>1</b> Behaviour of the material (dynamic response)	<b>2</b> Status of compaction (Comparison)	<b>3</b> Positioning, traceability during process	<b>4</b> Operational information (record and display)	<b>5</b> Control report, documentation	<b>6</b> Communication, others

From the pamplet *CECE – Guidelines to evaluate soil and asphalt compactors equipped with continuous compaction control (CCC)*

## ГЛОССАРИЙ ТЕРМИНОВ

**- А -**

**Амплитуда** Величина наибольшего отклонения от оси вибрации вибрирующего в вертикальной плоскости барабана, измеренного за один цикл колебаний.

**- В -**

**Верхний слой дорожного основания** Слой из предписанного или выбранного материала заданной толщины, сооружаемый поверх нижнего слоя дорожного основания и выполняющий одну или несколько функций, включая распределение нагрузки, дренирование и минимизацию влияния промерзания.

**Вибрация** Серия быстро чередующихся ударов (1400–4000 ударов в минуту), которая порождает быструю последовательность волн сжатия. Вибрации, генерируемые катком, способны разрушать установившиеся связи между частицами материалов, подвергающихся уплотнению.

**Влажность** Количество жидкости (воды) в единице объема вещества.

**- Г -**

**Глина** Мелкозернистый минеральный материал (грунт), который хорошо удерживает воду благодаря поверхностным электрохимическим зарядам.

**Глобальная навигационная спутниковая система (GNSS)** Общий термин, описывающий спутниковые технологии определения координат, включая GPS и ГЛОНАСС.

**ГЛОНАСС** Российская спутниковая система, аналогичная GPS.

**Гравий** Крупнозернистый минеральный материал; по классификации USCS – материал, состоящий из частиц размером менее 75 мм (3 дюймов), не проходящих через сито № 4.

**Градиент уплотнения** Изменение степени уплотнения от поверхности до глубины, достигаемой уплотняющим воздействием. Обычно прилегающий к поверхности грунт уплотняется меньше, средний грунт имеет максимальную степень уплотнения, а грунт, лежащий ниже, снова уплотняется меньше.

**Граница пластичности** Очень важная граница Аттерберга; точка, при которой грунт содержит достаточно влаги, чтобы стать пластичным.

**Граница текучести** Очень важная граница Аттерберга; точка, при которой грунт содержит столько воды, что он уже рассматривается как жидкость.

**Границы Аттерберга** Перечень стандартов, описывающих семь стадий изменения характеристик грунта при переходе из твердого состояния в текучее. Самые важные стадии – граница пластичности и граница текучести.

**Гранулометрический состав** Относительное содержание в грунте частиц различных размеров.

**Гранулометрический состав** Распределение по размерам частиц отдельно взятого грунта.

<b>Грунт</b>	Неконсолидированный материал, состоящий из минеральных частиц, которые могут содержать органические вещества.
- Д -	
<b>Двойной скачок</b>	См. Козление.
- Ж -	
<b>Жесткость (грунта)</b>	Способность материала (грунта) противодействовать деформации под действием нагрузки; основной показатель несущей способности грунта.
- З -	
<b>Заполнитель</b>	Сыпучий, несущий нагрузку минеральный компонент конструкции дороги. Как правило, заполнителем служит песок, гравий, ракушечный грунт, шлак, щебень или мелкозернистый материал.
<b>Земляное полотно</b>	Грунт, подготовленный для возведения на нем дорожного сооружения. Фактически это фундамент сооружения, и иногда его также называют «грунтовым основанием» или «грунтом основания».
<b>Зерно</b>	Минеральная частица.
- И -	
<b>Интеллектуальное уплотнение</b>	В общем случае интеллектуальное уплотнение может быть определено как применяемая на катках в процессе уплотнения технология, которая позволяет повысить эффективность ведения работ на объекте за счет устранения работы наугад.
<b>Испытание по Проктору (стандартное или модифицированное)</b>	Лабораторное испытание для определения максимальной плотности сухого грунта и оптимальной влажности для достижения максимальной плотности.
- К -	
<b>Калибровка</b>	Процесс корректировки параметров системы с целью максимального расширения возможностей ее применения на объекте.
<b>Капиллярность</b>	Способность материала поглощать воду в направлении вверх и горизонтальном направлении.
<b>Козление</b>	Явление, известное также как «двойной скачок», при котором валец отскакивает вверх после вибрационного удара достаточно высоко, чтобы последующий вибрационный удар происходил, пока валец находится в воздухе.
<b>Контрольный режим</b>	Настройка системы катка, оптимизирующая его пригодность для работы с высокой точностью, когда производительность не является главной задачей.
<b>Коэффициент неоднородности</b>	Параметр, описывающий распределение частиц грунта по размерам (кривая гранулометрического состава).
<b>Крупнозернистый грунт</b>	Грунт, состоящий из частиц (зерен), между которыми отсутствует связность. Песок и гравий относятся к крупнозернистым грунтам. Крупнозернистые грунты подразделяются на имеющие хорошо подобранный по фракциям состав и имеющие плохо подобранный по фракциям состав, что отражает то, насколько эффективно они поддаются уплотнению.
- Л -	
<b>Линейная нагрузка</b>	Используемый в промышленности показатель для сравнения эффективности уплотнения статических гладковальцовых катков.

### - М -

<b>Манипуляция</b>	Процесс перемешивания грунта, в результате которого частицы сбиваются в более плотную массу.
<b>Машинное измерение уплотнения</b>	Измерение степени уплотнения при помощи специальных средств, установленных на машине, осуществляющей уплотнение.
<b>Мелкие фракции</b>	Обычно материалы в виде частиц очень малого размера, который ниже предельно допустимого для ситового анализа. Мелкие фракции проходят через сито с самым малым размером ячеек. Различные организации в мире имеют свои независимые определения размеров ячеек сит для частиц наименьшей крупности, но эти размеры приблизительно совпадают.
<b>Мелкозернистые грунты</b>	Грунты, состоящие в основном из мелких фракций.
<b>Метод измерения степени уплотнения (CMV)</b>	Метод определения жесткости грунта, изобретенный шведской фирмой Geodynamik и используемый компанией Caterpillar.
<b>Метод измерения энергии</b>	Принцип работы показателя уплотнения Machine Drive Power (MDP). Запатентованный компанией Caterpillar метод определения степени уплотнения путем измерения энергии, требуемой для движения катка по грунту (преодоления сопротивления качению).
<b>Метод усилия/смещения</b>	Метод определения жесткости грунта, при котором на основе характеристик вальца и результатов измерения ускорения вальца, вычисляется смещение вальца.

### - Н -

<b>Насыпь</b>	Любой насыпной грунт, верхняя поверхность которого расположена выше окружающей поверхности.
<b>Несущая способность</b>	Способность материала выдерживать нагрузку.
<b>Нижний слой дорожного основания</b>	Слой дорожной одежды, расположенный между земляным полотном и верхним слоем дорожного основания.

### - О -

<b>Одноразмерный гранулометрический состав</b>	Также называемый плохо подобранным гранулометрическим составом; качественная характеристика крупнозернистых грунтов, отражающая тот факт, что они состоят из частиц, относительно одинаковых по размеру, и поэтому плохо поддаются уплотнению.
<b>Однородность</b>	Единообразие материалов и методов ведения работ.
<b>Осадка</b>	Процесс опускания поверхности в результате консолидации насыпного материала.

### - П -

<b>Песок</b>	Несвязные минеральные частицы определенного размера и формы.
<b>Пластичность</b>	Свойство мелкозернистых грунтов необратимо деформироваться без потери целостности или заметного изменения в объеме.
<b>Плотность</b>	Величина, определяемая массой единицы объема; традиционный показатель несущей способности.

<b>Плохо подобранный гранулометрический состав</b>	Также называемый неравномерно подобранным гранулометрическим составом; качественная характеристика крупнозернистых грунтов, отражающая то, что они состоят из относительно одинаковых по размеру частиц и поэтому плохо поддаются уплотнению.
<b>Показатель степени уплотнения <i>SMV</i></b>	Показатель жесткости грунта, вычисляемый на основе результатов измерения ускорения силы тяжести на частоте вибраций вальца и первой гармонике (частоте, вдвое превышающей частоту вибраций вальца).
<b>Полная приложенная сила</b>	Определяемое расчетным путем максимальное количество вибрационной энергии, которую каток может передать на землю.
<b>Приемочный контроль качества</b>	Методы испытаний и данные, используемые заказчиком для того, чтобы задокументировать качество уплотнения, достигнутое на объекте.
<b>Продуктивный режим</b>	Настройка системы катка, оптимизирующая его пригодность для работы с высокой производительностью, когда точность не является главной задачей.
<b>Проницаемость вещества</b>	Способность материала пропускать через себя газообразные или жидкие вещества.
<b>Проход</b>	Число раз, которое каток проходит по одному участку грунта. Иногда под проходом подразумевают движение передним ходом и возврат задним ходом, т. е. прохождение по одному и тому же участку дважды, в других случаях под проходом подразумевают однократное прохождение катка по участку. В компании Caterpillar принято считать проходом однократное прохождение по участку передним или задним ходом.
<b>Пустоты</b>	Пространство в объеме материала, не занятое твердым минеральным материалом.
<b>Пылеватый грунт</b>	Несвязный мелкозернистый минеральный материал (грунт).
<b>- P -</b>	
<b>Рабочий контроль качества</b>	Регламент, соблюдаемый подрядчиком для того, чтобы обеспечить соответствие работ по уплотнению требованиям технических условий.
<b>Разуплотнение</b>	Снижение степени уплотнения грунта из-за повторного и излишнего уплотняющего воздействия.
<b>Распределение частиц по размерам</b>	См. Гранулометрический состав.
<b>Резонанс</b>	Совпадение частоты вибрации двух вибрирующих масс.
<b>Резонансная частота</b>	Для виброкатков – точка, в которой вибрирующий грунт усиливает вибрацию катка в такой степени, что уплотняющее усилие катка начинает превышать генерируемую центробежную силу, т. е. отдача превышает затраченное усилие.
<b>Резонансный показатель <i>RMV</i></b>	Показатель степени приближения вальца к вхождению в режим козления.
<b>Рекультивация</b>	Процесс изменения состава грунта с помощью химического или механического воздействия, направленный на улучшение его технологических свойств.
<b>- C -</b>	
<b>Связность</b>	Способность материала сохранять прочность в свободном состоянии, т. е. противодействовать разъединению при изменении влажности или погружении в жидкость.

## ГЛОССАРИЙ

<b>Сжимаемость</b>	Скорость уменьшения грунта в объеме под действием внешней силы.
<b>Система глобального позиционирования (GPS)</b>	Находящаяся под контролем США всемирная радионавигационная система, насчитывающая 24 спутника с их наземными станциями.
<b>Слой</b>	Отдельный слой уложенного грунта. Может иметь разную толщину.
<b>Собственная частота колебаний</b>	Частота колебаний тела, обусловленная собственными характеристиками тела.
<b>Сопrotивление качению</b>	Количество энергии, требуемое для качения предмета круглой формы по материалу.
<b>Сопrotивление сдвигу</b>	Противодействие частиц грунта взаимному смещению, возникающему под действием уплотняющей силы.
<b>Стабилизация грунта</b>	Процесс максимального улучшения пригодности грунта для конкретной строительной цели.
<b>Станция</b>	Нестандартный участок объекта, выбранный инженерами и отмеченный вехами с целью контролируемой подготовки поддающимися управлению частями.
<b>Статическое давление</b>	Вес, приложенный для создания уплотняющего воздействия.
- Т -	
<b>Текстура</b>	Свойство, определяющее поверхностное трение частицы грунта.
- У -	
<b>Удары</b>	Сила увеличенной амплитуды, возникающая при преобразовании статического давления в динамическое, например при падении груза на какую-либо поверхность. К ударным воздействиям принято относить низкочастотные или нерегулярные по частоте удары (в диапазоне 50–600 ударов в минуту).
<b>Уклон</b>	Наклон поверхности.
<b>Уплотнение</b>	Процесс уменьшения объема пор и повышения плотности материала за счет механического воздействия; увеличение плотности.
<b>Уплотняемость</b>	Показатель способности грунта преодолевать характерное для данного грунта сопротивление деформации.
<b>Упругость</b>	Способность материала принимать первоначальную (или близкую к первоначальной) форму после прекращения действия сжимающей нагрузки.
- Х -	
<b>Хорошо подобранный гранулометрический состав</b>	Качественная характеристика крупнозернистых грунтов, отражающая тот факт, что они состоят из частиц различных размеров и поэтому лучше поддаются уплотнению.
- Ц -	
<b>Центробежная сила</b>	Сила, под действием которой вращающийся неуравновешенный груз с ускорением удаляется от оси вращения.
- Ч -	
<b>Частота</b>	Количество полных циклов (например, вибраций) в единицу времени.

**Число пластичности** Разность между границей текучести и границей пластичности грунта. Данная величина используется для определения степени стабилизации, необходимой для мелкозернистых грунтов.









WARNING  
SAFETY  
OPERATION

TUBELESS



**CAT** CS78B