

## Оценка эффективности применения грунтоуплотняющих машин и механизмов

*Д.М. Тимофеев*

*Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета*

**Аннотация:** В статье поднимается проблема уплотнения грунта. Проведен анализ зависимости продолжительности уплотнения от различных факторов, таких как: тип грунта, его влажность его физические свойства, а также объем. Приведен обзор технологий уплотнения, применяемых на данный момент в строительстве. Приведены результаты используемых технологий при строительстве объекта «Проект Юг. Второй этап строительства МНПП Волгоград-Тихорецк. ГПС Тингута». Исследование позволит строительным организациям осуществлять оценку экономической целесообразности использования грунтоуплотняющих машин и механизмов.

**Ключевые слова:** уплотнение, влажность грунта, плотность грунта, связные грунты, несвязные грунты, уплотняющие механизмы, вибродинамическое воздействие, глубина уплотнения, эффективные способы уплотнения.

Современные технологии в строительстве предъявляют все более высокие требования к качеству уплотнения грунта, что делает эту проблему актуальной для научных исследований (Александрова Н. П., Семенова Т.В., Стригун К.Ю. [1], Афиногенов А.О. [2], Васильева Е. В. [4], Игнатъев А.А. [5], Васильев Ю.С., Минаев О.П., [3; 7; 8], Ключникова О.В., Шаповалова А.Г., Цыбульская А.А. [6], Окост М.В. [9], Туманян С.Б. [10], Wersäll, Carl, Ingmar Nordfelt, Stefan Larsson. [11] Yusoff, Siti Aimi Nadia Mohd [12] и др.).

На сегодняшний день нам известно множество способов уплотнения различных типов грунтов, а также специализированных машин и механизмов способных работать в самых сложных условиях. Для того чтобы определить необходимость и экономическую целесообразность грунтоуплотняющих машин и механизмов, нам недостаточно знать только существующие классификации механизмов, которые учитывают мощность, принцип воздействия на грунт, способ агрегатирования и вид рабочего органа. Нам необходимо провести анализ зависимости продолжительности уплотнения от

---

различных факторов, таких как: тип грунта, его влажность его физические свойства, а также объем и внешние (как правило, погодные) условия уплотнения грунтов.

Сейчас нам известно, что наиболее эффективно уплотняются несвязанные грунты, так как между их частицами нет цементационных связей. К этим типам грунта относятся песчаные, песчано-гравийные, валунно-галечные, крупнообломочные и скальные. Они обладают большей чувствительностью к различным сотрясениям, ударам и вибрациям, тем самым более высокой деформационной реакцией на динамические воздействия грунтоуплотняющих машин. Именно поэтому эффективными и целесообразными средствами уплотнения таких грунтов становятся вибрационные уплотняющие механизмы.

**В несвязанных грунтах** можно выделить две основные группы грунтов и охарактеризовать продолжительность уплотнения в зависимости от их физико-механических свойств, влажности и объема необходимых работ.

*1. Скальные, валунно-галечные и несвязные крупнообломочные грунты.*

Для данных типов грунта перед их уплотнением не требуется специальной подготовительной работы в виде дополнительного увлажнения или высушивания. Например, если в крупнообломочных грунтах содержится до 30 % связного мелкозема, то его уплотнение можно проводить при влажности до  $1,3 W_0$  (выше оптимальной). Если связный мелкозем составляет более 30 %, то уплотнение проводят в пределах оптимальной влажности (от  $0,9 W_0$  и до  $1,1 W_0$ ) и при уменьшении толщины отсыпаемого слоя на 30-50% [13].

Для достижения необходимого уровня уплотнения скальных, валунно-галечных и крупнообломочных грунтов виброкатку необходимо в среднем 8-12 проходов, при этом уплотнение слоя может составлять до 8-12 % от его толщины [13]. В связи с тем, что грунты крупной фракции оказывают

---

большое давление на уплотняющее оборудование, для вальца требуется более высококачественная и толстая сталь. Для проведения подобных работ необходимы тяжелые гладковальцовые катки.

Современное строительство по международным контрактам предъявляет новые требования к работе с каменными грунтами [14]. Для уплотнение большого объема каменного материала слоем 1,0 м. необходимо использовать вибрационные катки, оборудование грунтоуплотняющего механизма которого составляет 10 т. Для уплотнения слоев толщиной 2,0 м подойдут более тяжелые катки (весом от 10 до 30 тонн), которые, в свою очередь, имеют большие габаритные размеры, и их нельзя использовать в стесненных условиях. При больших слоях уплотнения и высокой стесненности, существует высокая необходимость применения тяжелых самоходных виброплит, а при небольших слоях уплотнения (до 0,3м), как правило, применяют виброплиты и трамбовки весом до 100 кг.

Анализ исследований Афиногенова А.О., Игнатьева А.А., Минаева О.П., Туманян С.Б. позволяет нам сформулировать зависимость веса гладковальцовых вибрационных катков от крупности уплотняемых несвязанных грунтов при условии оптимальной влажности уплотняемого слоя равного 0,5 м. (рис 1.).

2. *Песчаные грунты и песчано-гравийные смеси* требуют перед уплотнением проведения процедуры увлажнения. Данные типы грунтов не имеют в составе пылеватых и глинистых частиц, поэтому вода способствует лучшей передаче вибрационных воздействий вглубь грунтового массива. Худшие показатели по уплотнению виброкатками имеют увлажненные мелкие пески «из-за взвешенности их частиц в воде, поэтому их влажность должна быть снижена до значений, близких к оптимальным» [13]. Существует практика уплотнения непывеватых песков в их сухом состоянии,

---

но степень уплотнения и глубина передачи вибрационных воздействий при таком уплотнении будет меньше, чем у влажного песка.



Рис. 1. – Зависимость веса применяемого грунтоуплотняющего оборудования от размера уплотняемых частиц

В сухом состоянии необходимую плотность в верхнем слое (10-20 см) трудно получить из-за низкой сдвиговой прочности песка. Практически всегда верхний слой песчаных грунтов и смесей находится в разуплотненном состоянии, и тем самым, ухудшает передачу вибрационных воздействий грунтоуплотняющего механизма нижним слоям насыпи, он действует как гаситель колебаний, снижая качество уплотнения [5; 15]. Например, при устройстве насыпей из непылеватых песчаных грунтов рекомендуется увлажнять хотя бы поверхностный слой песка не ниже 6-8 %, затем учитывать его при уплотнении последующего за счет уменьшения толщины нового слоя на 10-20 см.

Для эффективно уплотнения непылеватого песчаного грунта и гравия толщиной до 0,5 м и более, подходят средние гладковальцовые катки. Так,

---

например, при строительстве объекта «Проект Юг. Второй этап строительства МНПП Волгоград-Тихорецк. ГПС Тингута» было произведено опытное уплотнение пылеватого песка средним гладковальцовым вибрационным катком. Для достижения предусмотренным проектом коэффициента уплотнения равного 0,98, потребовалось произвести 8-10 проходов катка.

*Пылеватые пески и супеси* гораздо труднее поддаются уплотнению вибрацией во влажном состоянии, чем непылеватые пески в связи с тем, что их дренирующие свойства ниже.

Нам приходится учитывать влажность и толщину насыпного материала для подбора грунтоуплотняющего оборудования. Так, например, ряд исследований показывают, что «пылеватые супеси при влажности  $0,5 \div 0,7$  практически невозможно уплотнить до степени 0,95 даже тяжелым виброкатком массой 12-13 т. Эти грунты рекомендуется уплотнять такими средствами при влажности, равной  $0,9 \div 1$ . Если же она ниже и составляет  $0,75 \div 0,85$ , то следует уменьшать толщину отсыпаемого слоя в 1,5-2 раза и увеличивать количество проходов виброкатка по одному следу до 12-14» [13].

Уплотнение больших слоев и объемов песка (пылеватых песков) и супесей на сегодняшний день очень выгодно и экономически целесообразно уплотнять виброустановками.

При уплотнении песка «толщиной более 1,5-2 м рекомендуется применять метод глубинного виброуплотнения сразу на всю глубину уплотняемого песчаного основания при насыщении маловлажного слоя песка водой непосредственно в процессе виброуплотнения» [8, с. 109]. Создаваемое вибрацией динамическое воздействие увеличивает напряженное состояние уплотняемого песка, при котором происходит более равномерное и эффективное уплотнение на значительной площади (диаметром до 4-5 м).

---

Минаев О.П. в своих трудах считает «основным фактором при выборе метода вибродинамического глубинного уплотнения песчаных грунтов и оснований... величину вибродинамического воздействия, необходимую для достижения заданной глубины уплотнения основания» [7]. Объем уплотненного песка с использованием метода вибродинамического глубинного уплотнения при одном погружении до 6 м составляет 70-80 м<sup>3</sup>, при этом время одного погружения составляет 8-10 мин. В процессе уплотнения образуются две зоны: внутренняя зона (диаметром 90 см) и внешняя зона (диаметр составляет 244-305 см.). Важно знать, что «категорически не рекомендуется применять метод глубинного виброуплотнения при наличии в основании песчаных грунтов коренных пород, сложенных глинистыми грунтами текучей или текучепластичной консистенции» [8, с. 109].

Данное оборудование является экономичным и эффективным. Одна глубинная виброустановка способна уплотняет в сутки от 3000 до 6000 м<sup>3</sup> песка. Данное оборудование является экономичным и эффективным. При небольших объемах и глубинах уплотнения так же применяют способы вибрационной укатки отсыпаемых слоев.

**Связанные** грунты в отличие от несвязанных имеют иные прочностные и деформационные свойства, которые определяются количественным содержанием в нем глинистых частиц и воды. Из-за этих свойств даже при оптимальной влажности при их уплотнении требуется значительное статическое и динамическое усилие. Так, например, воздействий, которые оказывают на грунт современные грунтоуплотняющие механизмы среднего и тяжелого типов, для связного грунта может оказаться недостаточно. Это возможно при условии уплотнения таких грунтов тонкими слоями. Легкие грунтоуплотняющие механизмы на связных грунтах

---

использовать не рекомендуется. Все эти факты связанных грунтов ведут к значительному увеличению продолжительности уплотнения.

Процесс и продолжительность уплотнения также в значительной степени зависит не только от типа грунта, но и от его влажности. Действие воды на поверхность грунта в результате приложенной нагрузки снижает трение частиц грунта между собой при уплотнении насыпи. Известно, что увеличение влажности будет приводить к повышению его плотности, но до определенного предела, когда (при дальнейшем увеличении влажности) плотность грунта начнет уменьшаться. Это объясняется тем, что вода не сжимается при заполнении ею, свободных пор в рыхлом грунте.

Уплотнение грунта с минимальными экономическими затратами пройдут при оптимальной влажности. Точное количество (значение) необходимого увлажнения определяют на основе пробных уплотнений на небольшом участке. Для эффективного использования грунтоуплотняющих машин и механизмов сухие грунты, как правило, доувлажняют, а переувлажненные подсушивают при их послойном уплотнении.

Приходится также учитывать, что требуемую плотность связанного грунта невозможно получить при однократном прохождении грунтоуплотняющей машины. Так, например, интенсивное нарастание плотности насыпного грунта при его уплотнении резко снижается уже после 3-4 проходов катка, а к 10 - 12 – уплотнения практически не происходит. Установить оптимальное число проходов, а так же количество проходок, когда будет наблюдаться разуплотнение верхнего слоя насыпи, можно только с помощью пробного уплотнения грунта. В среднем оно варьируется в пределах 6-8 проходов катка по одному и тому же участку.

Теперь более подробно остановимся на конкретных типах связанных грунтов и их зависимостей относительно свойств и влажности, для подбора наиболее оптимальных показателей уплотнения.

---

1. *Пылеватый суглинок* (с влажностью менее  $0,80 \div 0,85$  от оптимальной) и пылеватую супесь (влажностью менее  $0,70 \div 0,75$ ) уплотнить до  $0,95$  невозможно, даже если будут использоваться тяжелые грунтоуплотняющие виброкатки. Уплотнять суглинки средними и тяжелыми грунтоуплотняющими механизмами «рекомендуется при оптимальной влажности, но не менее  $0,85 \div 0,90$ , причем слоями не более 20-30см, за 10-12 проходов катка по одному следу» [13]. Если влажность суглинка оптимальная, рекомендуется увеличить толщину уплотняемого слоя в 1,5-2 раза, что позволит ускорить время работ по его уплотнению.

2. *Связные пластичные и переувлажненные грунты* рекомендуется уплотнять с использованием виброкатков с кулачковыми вальцами. Благодаря им на 5-10 см увеличивается уплотняемый слой, что делает работу более эффективной по сравнению с гладковальцовыми вибрационными и кулачковыми статическими катками.

3. *На комковатых суглинках и глинах* при пониженной и нормальной влажности наиболее целесообразно применение грунтоуплотняющих механизмов с шиповыми кулачками. На переувлажненных связных грунтах из-за быстрого залипания вальца, их использование не целесообразно. Виброкатки с сегментными кулачками являются более универсальными и эффективными. По сравнению с катками с шиповыми кулачками они подходят для многих разновидностей грунтов (как низкой, так высокой связности, в том числе комковатых и переувлажненных) и способны более качественно производить уплотнение [5; 13].

Наиболее эффективными для уплотнения больших объемов связанных грунтов являются катки на пневмашинах массой до 35т. (они способны уплотнять до 175 м<sup>3</sup>/час насыпного связанного грунта толщиной уплотняемого слоя до 50 см.) и кулачковые виброкатки. Крупные и тяжелые кулачковые катки оказывают давление до 45–55 кгс/см<sup>2</sup>, что почти в 3 раза

---

выше гладковальцовых аналогов. Это дает им преимущество при уплотнении высокосвязных и достаточно прочных тяжелых суглинков и глин, включая их разновидности с пониженной влажностью. Однако для их эффективности имеются ограничения, так как эти грунтоуплотняющие механизмы довольно проблематично использовать в стесненных условиях.

Для работы в стесненных условиях применяют управляемые вручную трамбовки, подвесные на экскаваторах и кранах трамбовки со свободным падением груза.

Необходимо обращать внимание что, «экономически наиболее целесообразно достигать повышенных значений плотностей в верхней части рабочего слоя земляного полотна (толщиной 0,6-1,5 м). Технологией повышенного уплотнения грунтов предусматривается использование грунтоуплотняющих машин, создающих нагрузку на грунт, близкую к пределу его прочности» [13].

Таким образом, при выборе грунтоуплотняющего механизма необходимо учитывать целый ряд факторов. Так, если у организации нет тяжелых дорогостоящих грунтоуплотняющих машин, то учитывая влажность грунта, его тип и объем производимых работ, можно использовать имеющееся в наличии оборудование с наименьшими экономическими потерями.

### Литература

1. Александрова Н.П., Семенова Т.В., Стригун К.Ю. Совершенствование методов экспресс оценки качества уплотнения грунтов земляного полотна строительства автомобильных дорог // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2015. №. 4 (44). С. 46-52.

2. Афиногенов А.О. Эффективность повышения степени уплотнения грунтов земляного полотна карьерных автомобильных дорог // Вестник КузГТУ. 2008. №1. С. 55-60.



3. Васильев Ю.С., Минаев О.П. О вибрационных катках в гидротехническом строительстве // Гидротехническое строительство. 2016. № 2. С. 10-14.

4. Васильева Е. В. Технология работ при досыпке грунтовых водоподпорных сооружений //Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1955

5. Игнатьев А.А. Определение рациональных параметров вибрационных катков для уплотнения грунта //диссертация ... кандидата технических наук : 05.05.04 / автомобил.-дорож. гос. техн. ун-т. Ярославль, 2013. С. 182.

6. Ключникова О.В., Шаповалова А.Г., Цыбульская А.А. Основные принципы выбора типа и количества строительных машин для комплексного производства работ // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2064

7. Минаев О. П. Выбор и использование метода уплотнения песчаных оснований и сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 7 (51). С. 66-73.

8. Минаев О.П. Выбор метода и основных параметров вибродинамического глубинного уплотнения песчаных грунтов оснований//Вестник гражданских инженеров. -2013. № 5 (40). С. 108-115

9. Окост М.В. Повышение нагрузок и скоростей движения требует усиления железнодорожного // Инженерный вестник Дона, 2008, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/71

10. Туманян С.Б. Определение параметров и режимов работы уплотняющего оборудования с комбинированным воздействием на уплотняемую среду // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Москва, 1994. С. 166.

11. Wersall, Carl, Ingmar Nordfelt, and Stefan Larsson. "Resonant roller compaction of gravel in full-scale tests." *Transportation Geotechnics* 14 (2018): pp.93-97.

12. Yusoff, Siti Aimi Nadia Mohd, et al. "The effects of different compaction energy on geotechnical properties of kaolin and laterite." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1875. No. 1. AIP Publishing, 2017. URL: [aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4998380](http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4998380).

13. Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Методические рекомендации по повышению эффективности использования виброкатков при сооружении земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. URL: [znaytovar.ru/gost/2/Methodicheskie\\_rekomendaciiMeto361.html](http://znaytovar.ru/gost/2/Methodicheskie_rekomendaciiMeto361.html)

14. Уплотнение и укладка дорожных материалов. Теория и Практика. Издание 2-е Издательство "Тест-Принт" Санкт-Петербург, 1995. С. 184.

15. Реконструкция промышленных предприятий. Справочник строителя. Том 1, 2./под ред. Топчий В.Д., Гребенник Р.А. Москва, Стройиздат, 1990 г. 1380 с., С. 236 – 238.

### References

1. Aleksandrova N.P., Semenova T.V., Strigun K.Ju. *Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii*. 2015. №. 4 (44). pp. 46-52.

2. Afinogenov A.O. *Vestnik KuzGTU*. 2008. №1. pp. 55-60.

3. Vasil'ev Ju.S., Minaev O.P. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo*. 2016. № 2. pp. 10-14.

4. Vasil'eva E. V. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2013, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1955](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1955)

5. Ignat'ev A.A. *Opredelenie racional'nyh parametrov vibracionnyh katkov dlja uplotnenija grunta*. [Determination of the rational parameters of vibrating rollers for compaction of soil] dissertacija ... kandidata tehničkih nauk: 05.05.04. *Avtomobil.-dorozh. gos. tehn. un-t. Jaroslavl'*, 2013. pp. 182.

6. Kljuchnikova O.V., Shapovalova A.G., Cybul'skaja A.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2064](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2064)

7. Minaev O. P. Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2014. № 7 (51). pp. 66-73.

8. Minaev O.P. Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2013. № 5 (40). pp. 108-115

9. Okost M.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2008, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/71](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/71)

10. Tumanjan S.B. Opredelenie parametrov i rezhimov raboty uplotnjajushhego oborudovanija s kombinirovannym vozdejstviem na uplotnjaemuju sredu [Determination of the parameters and operating conditions of the sealing equipment with combined action on the sealing medium]. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk. Moskva, 1994. pp. 166.

11. Wersall, Carl, Ingmar Nordfelt, and Stefan Larsson. "Resonant roller compaction of gravel in full-scale tests." *Transportation Geotechnics* 14 (2018): pp 93-97.

12. Yusoff, Siti Aimi Nadia Mohd, et al. "The effects of different compaction energy on geotechnical properties of kaolin and laterite." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1875. No. 1. AIP Publishing, 2017. URL: [aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4998380](http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4998380).

13. Harhuta N.Ja., Vasil'ev Ju.M. Metodicheskie rekomendacii po povysheniju jeffektivnosti ispol'zovanija vibrokatkov pri sooruzhenii zemljanogo polotna avtomobil'nyh dorog [Methodical recommendations for increasing the efficiency of using vibratory rollers in the construction of roadbeds of highways]. M.: Transport, 1975. URL: [znaytovar.ru/gost/2/Methodicheskie\\_rekomendaciiMeto361.html](http://znaytovar.ru/gost/2/Methodicheskie_rekomendaciiMeto361.html)

---



14. Uplotnenie i ukladka dorozhnyh materialov. Teorija i Praktika [Sealing and laying of road materials. Theory and practice]. Izdanie 2-e Izdatel'stvo "Test-Print" Sankt-Peterburg, 1995. p. 184.

15. Rekonstrukcija promyshlennyh predpriyatij. Spravochnik stroitelja. [Reconstruction of industrial enterprises. Builder's Guide]. Tom 1, 2. pod red. Topchij V.D., Grebennik R.A. Moskva, Strojizdat, 1990 g. 1380 s., pp. 236 – 238.