

УДК 625.7:624.138

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПЛОТНЕНИЯ НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ ЗА СЧЕТ РЕГУЛИРОВАНИЯ МЕЖФАЗНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ

Канд. техн. наук, доцент **А.А. Игнатьев**,  
инженер **Г.В. Пренглаев**

(Ярославский государственный  
технический университет)

Контактная информация: [ignatyevaa@yustu.ru](mailto:ignatyevaa@yustu.ru);

[prenglaev@gmail.com](mailto:prenglaev@gmail.com);

89109637334;

8(4852) 44-03-67

---

*Приведены результаты исследований, направленных на повышение эффективности уплотнения несвязных грунтов путем регулирования межфазного взаимодействия частиц. Доказана эффективность уплотнения несвязных грунтов при оптимальной влажности за счет определения продолжительности выдерживания грунта по времени с водой. Результаты исследований показывают возможность достижения более высоких показателей плотности сухого грунта. Предложена методика, которая может быть успешно реализована на практике в процессе выполнения работ по уплотнению грунтов.*

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, грунт, коэффициент уплотнения, оптимальная влажность, плотность, минеральное зерно.

---

Автомобильные дороги – важнейшее звено транспортной инфраструктуры любого государства, без которого не может функционировать ни одна отрасль экономики. Уровень развития и техническое состояние дорожной сети оказывает существенное влияние на экономическое и социальное развитие страны в целом и ее отдельных регионов. Российская Федерация – государство, расположенное на огромной территории, но дорожная сеть которого развита недостаточно. В связи с этим требуется принятие серьезных мер по дальнейшему развитию автомобильных дорог страны.

Рост доли большегрузных автомобилей в общем транспортном потоке – неотъемлемое условие роста экономики. Установлено, что перевозка грузов на короткие и средние расстояния выгодна именно автотранспортом. Поэтому в современных условиях, в связи со значительным износом существующей сети автомобильных дорог, так важно уделять внимание именно качеству строительства автомобильных дорог.

В первую очередь при строительстве автомобильных дорог особую значимость имеет качество уплотнения грунтов земляного полотна как одна из наиболее ответственных и важных технологических операций. Хотя стоимость работ по уплотнению грунтов составляет лишь несколько процентов от общей стоимости строительства, роль таких работ для сохранения качества автомобильных дорог трудно переоценить. В настоящее время основными машинами для уплотнения несвязных грунтов в зависимости от условий производства работ являются статические и вибрационные катки, трамбовки, виброплиты и вибротрамбовки. Более подробно технология уплотнения несвязных грунтов рассмотрена в [1].

В процессе уплотнения грунта происходит перекомпоновка минеральных частиц с уменьшением его пористости. В результате увеличиваются прочностные и деформационные характеристики грунта.

В настоящее время в РФ для оценки качества уплотнения грунтов используется коэффициент уплотнения ( $K_u$ ) – отношение плотности (скелета) сухого грунта на объекте к стандартной максимальной плотности (скелета) сухого грунта, определяемой в лабораторных условиях прибором стандартного уплотнения СоюзДорНИИ по методике, описанной в ГОСТ 22733-2016 [2]. Методикой предусматривается лабораторное определение максимальной плотности сухого грунта и соответствующей ей оптимальной влажности в стандартных условиях испытания. В зависимости от назначения объекта строительства и условий выполнения работ требуемый коэффициент уплотнения грунта может варьироваться в пределах от 0,91 до 1,00.

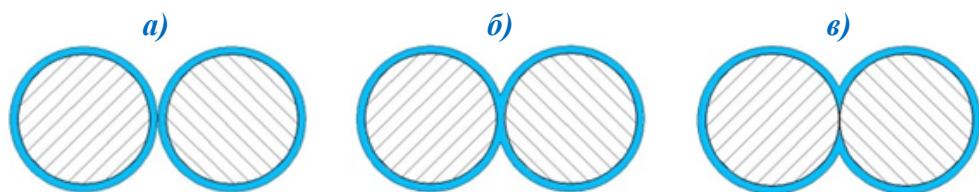
Остановимся более подробно на уплотнении песчаного грунта при оптимальной влажности (за исключением однородных песков, поскольку их применение в строительстве ограничено ввиду сложности уплотнения). Минеральное зерно песчаного грунта в основном представляет собой кристаллическое ядро с аутогенной оболочкой (рис. 1 а). Такая оболочка анизотропна, толщиной от 2...5 до 20...30 мкм. В отдельных ее фрагментах может преобладать субмикроструктурная структура, в других вещество может находиться в аморфном состоянии. Для оболочки характерна высокая пористость. В целом она обладает существенно меньшей твердостью (4-5 единиц по шкале Мооса), чем кристаллическое, например, кварцевое ядро (7 – по Моосу). При увлажнении возможно снижение механических характеристик такой оболочки.

Наличие оболочки зачастую определяет характер взаимодействия между зёрнами грунта при их передвижении в процессе уплотнения. В зависимости от давления в зоне контакта возможны следующие варианты взаимодействия.

На первоначальном этапе роста действующей нагрузки на грунт контакт зерен осуществляется через их оболочки (1-й тип контакта зерен грунта – **рис. 1 а**). При этом между действующей нагрузкой и деформацией грунта наблюдается практически линейная зависимость. При дальнейшей нагрузке происходит качественное изменение состояния оболочки за счет уменьшения содержания в ней воды и уплотнения вещества, из которого она состоит. В результате происходит снижение скорости развития деформаций по отношению к росту действующей нагрузки. Дальнейший рост нагрузки приводит к увеличению контактных напряжений, что в большинстве своем приводит к продавливанию оболочек (2-й тип контакта – **рис. 1 б**).

По мере роста нагрузки все большее количество зерен начинает контактировать поверхностями своих ядер (3-й тип контакта – **рис. 1 в**). Фактически происходит прямой контакт одного кристаллического ядра с другим. Такое взаимодействие приводит к резкому увеличению коэффициента трения между частицами. При этом прекращаются деформации грунта, и резко падает эффективность его уплотнения.

Остановимся подробнее на процессах, происходящих в грунте при увлажнении его водой. Как показала практика, процессы взаимодействия грунта с водой носят временный характер. На первоначальном этапе, после замачивания грунта, наблюдается сорбция кластеров воды на аутогенной пленке. Далее происходит ее поверхностная диффузия. С течением времени при одинаковом количестве воды увеличивается число зон смачивания контактов зерен грунта. При уплотнении грунта на этом этапе вода будет способствовать снижению коэффициента трения, а уплотняемость грунта возрастет.



**Рис. 1. Межфазное взаимодействие зерен грунта в процессе уплотнения**

Через определенное время после увлажнения грунта, вода, взаимодействуя с аутогенной оболочкой, будет способствовать увеличению коллоидных продуктов. При уплотнении грунта на данном этапе колло-

идные продукты будут обеспечивать дальнейшее снижение коэффициента трения между частицами, и эффективность уплотнения еще больше возрастет.

При увеличении времени увлажнения грунта водой поры оболочек заполняются водой, и оболочки начинают приобретать упругое состояние. При уплотнении грунта на этом этапе начинает проявляться демпфирующий эффект, и возрастает доля упругих деформаций.

По истечении определенного периода времени увлажнения, характерного для каждого вида грунта, эффективность уплотнения начинает снижаться. При уплотнении на этой стадии грунт может разуплотняться, наблюдается диссипация энергии и даже нагрев грунта, что может приводить к увеличению его объема и, как следствие, снижению плотности. При испытании на приборе стандартного уплотнения [2] песчаный грунт при 30 ударах груза на данной стадии нагревался до 40...50 °С.

К сожалению, традиционными методами уплотнения с использованием различных машин и механизмов не учитывается ряд факторов, способствующих увеличению эффективности процесса уплотнения и, как следствие, повышению максимальной плотности. Опираясь на описание процессов взаимодействия грунтов с водой можно сделать вывод, что одним из таких факторов является время между окончанием увлажнения грунта и передачей на него уплотняющего воздействия. В наибольшей степени снижение коэффициента трения проявляется в том случае, когда глубина диффузии воды в пленку соответствует глубине взаимного проникания шероховатостей частиц грунта в зонах их контакта. Именно наличие воды в пленке обеспечивает эффективное снижение коэффициента трения между частицами грунта и, соответственно, лучшее уплотнение грунта. Суть предлагаемой технологии [3, 4] сводится к обеспечению и контролю продолжительности взаимодействия воды с грунтом (оптимальное время выдерживания грунта) и созданию в грунте при воздействии уплотняющей нагрузки контактных напряжений, обеспечивающих взаимодействие между зернами по 1 и 2 типу контактов.

Для подтверждения и развития данной теории в Ярославском государственном техническом университете был проведен ряд экспериментальных исследований на выявление оптимального времени выдерживания грунта при оптимальной влажности.

Поскольку наибольшее распространение при возведении земляного полотна и особенно дополнительных слоев основания дорожной одежды получили несвязные песчаные грунты, в качестве объекта исследования был выбран песок мелкий.

К сожалению, действующая классификация не является оптимальной, и пески даже одного классификационного состава значительно отличаются по своим физико-химическим свойствам, а также гранулометрическому составу. Поэтому оптимальная продолжительность замачивания должна определяться в лабораторных условиях для каждого вида грунта отдельно.

Гранулометрический состав исследуемых грунтов устанавливался по методике ГОСТ 12536-2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава» ситовым методом с промывкой водой.

Результаты экспериментальных исследований для мелкого песка с содержанием пылевато-глинистых частиц в количестве 11,1 % приведены в **табл. 1**. Вид грунта определялся по методике, согласно ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация».

**Таблица 1**

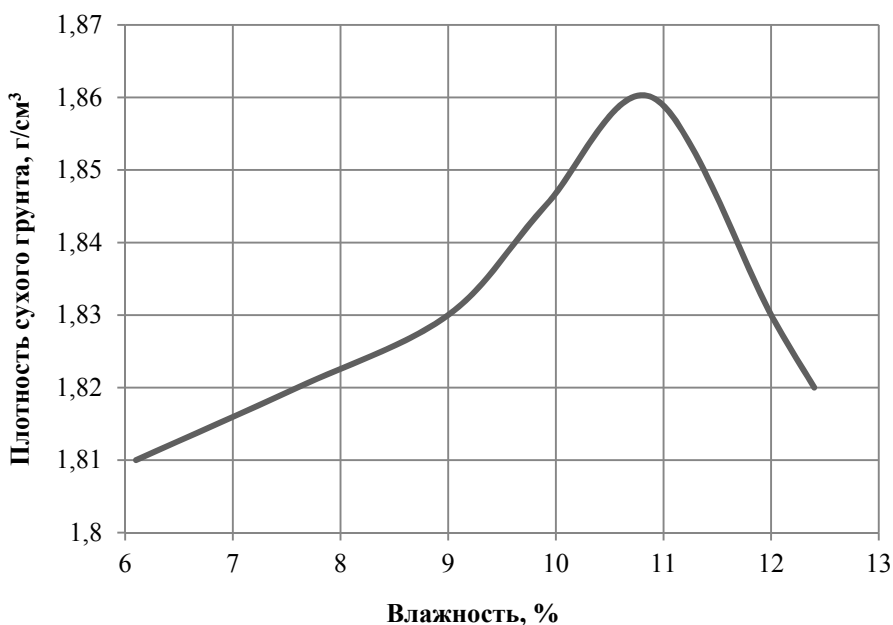
*Результаты ситового анализа песчаного грунта  
методом с промывкой водой*

<i>Диаметр сита, мм</i>	<i>10</i>	<i>5</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>0,5</i>	<i>0,25</i>	<i>0,1</i>	<i>&lt;0,1</i>
<i>Частный остаток, г</i>	-	0,8	2,6	3,6	10,1	30,3	79,6	19,3
<i>Частный остаток, %</i>	-	0,5	1,8	2,5	6,9	20,7	54,4	13,2
<i>Полный остаток, %</i>	-	0,5	2,3	4,8	11,7	32,4	86,8	100

Для выбранного грунта была определена оптимальная влажность на приборе стандартного уплотнения СоюзДорНИИ по методике, описанной в [2]. Значение оптимальной влажности для данного грунта составило 10,5 % (**рис. 2**). Плотность сухого грунта при оптимальной влажности – 1,856 г/см<sup>3</sup>.

Полученные данные легли в основу проведения исследований по определению продолжительности времени взаимодействия воды с грунтом (оптимальное время выдерживания грунта). Методика проведения исследований частично совпадала с методикой, описанной в [2].

В общей сложности было подготовлено три пробы грунта массой по 6 кг. Каждая проба была просеяна через сито диаметром 5 мм и растерта в фарфоровой ступке без дробления крупных частиц. Затем в каждую навеску было введено расчетное количество воды для доведения влажности до оптимального уровня (10,6 %).



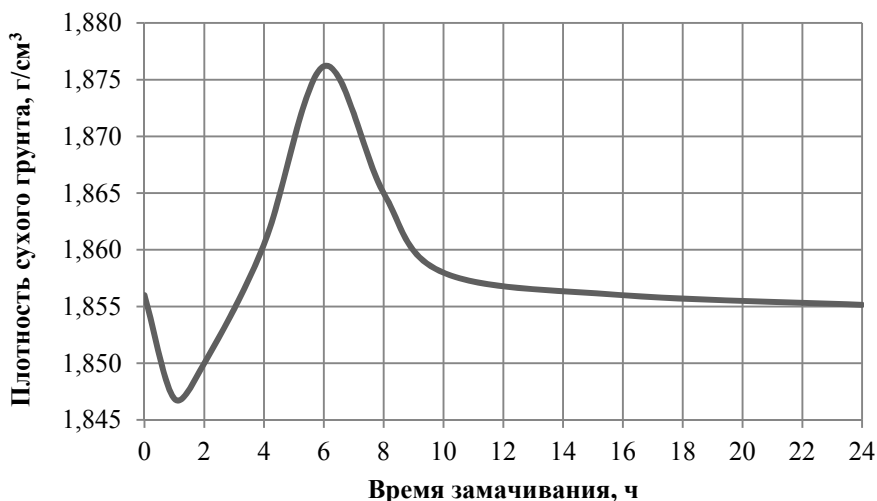
*Рис. 2. График стандартного уплотнения грунта*

Во избежание испарения влаги замачивание грунта в герметичной форме осуществляли в течение 24 ч. Данный диапазон времени был разбит на 8 интервалов: 0 минут, 1 ч, 2 ч, 4 ч, 6 ч, 8 ч; 10 ч и 24 ч. В каждый из указанных интервалов времени грунт извлекался из герметичной формы, затем проводились испытания на приборе стандартного уплотнения СоюзДорНИИ по методике [2]. После проведения испытания образец грунта вновь помещали в герметичную форму.

Методика проведения экспериментальных исследований заключалась в определении значений плотности через заданные интервалы времени. В качестве допущения было принято утверждение, что влажность остается на оптимальном уровне на всем протяжении эксперимента. На практике общее уменьшение влажности составило не более 0,5 % для всех испытаний в течение 24 ч.

По проведенным экспериментальным исследованиям и обработки массива данных были получены результаты, представленные на **рис. 3**.

Как видно из **рис. 3**, оптимальным временем выдерживания выбранного для экспериментальных исследований грунта (песок мелкий) при оптимальной влажности является период продолжительностью 6 ч. Была определена плотность скелета грунта, которая составила  $1,876 \text{ г/см}^3$ , что превышает значение, полученное для заданного грунта по традиционной методике определения плотности сухого грунта ( $1,856 \text{ г/см}^3$ ).



*Рис. 3. График выдерживания грунта при оптимальной влажности*

Следует отметить, что, согласно п. 6.1.13 ГОСТ 22733-2016 [2], пробу грунта для определения оптимальной плотности необходимо выдерживать в течение заданного времени (не менее 2 ч для несвязных грунтов и не менее 12 ч для связных). Но, так как все грунты различны, данные временные рамки не отражают реальной картины, и получается, что одинаковы для всех несвязных (не менее 2 ч) и связных грунтов (не менее 12 ч). Результаты экспериментальных исследований подтвердили тот факт, что для каждого вида грунта необходимо отдельно определять время выдерживания при оптимальной влажности. По утверждению авторов [3, 4], показатель роста уплотнения может достигать значения 1,15 от стандартной плотности и определяется лишь опытным путем.

Опираясь на результаты, полученные при проведении экспериментальных исследований, можно заключить, что методика выдерживания несвязных грунтов по времени при оптимальной влажности является эффективной, дает возможность достичь более высоких показателей плотности сухого грунта и может быть успешно реализована на практике в процессе выполнения работ по уплотнению грунтов на объекте с использованием различных уплотняющих машин и механизмов.

Применение рассмотренного выше способа уплотнения грунта на практике имеет следующие положительные стороны:

1. Способ является достаточно простым и не требует применения каких-либо специальных машин и механизмов, не связан с дополнительными затратами на его реализацию.
2. Выполняя работы по уплотнению с учетом оптимального времени выдерживания грунта при оптимальной влажности, на

объекте можно достичь более высоких значений коэффициента уплотнения при сохранении требуемых затрат на выполнение работ по уплотнению. Результаты экспериментальных исследований это успешно подтверждают.

3. Уплотнение несвязных песчаных грунтов до коэффициента уплотнения от 0,98 до 1,00 будет способствовать более эффективному их сопротивлению различным видам нагрузок и позволит увеличить срок службы автомобильной дороги со снижением затрат на ее ремонт, содержание и эксплуатацию.

В настоящее время продолжают исследования по определению оптимального времени выдерживания песчаных грунтов при оптимальной влажности для дальнейшего совершенствования технологии уплотнения несвязных грунтов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Тюремнов И.С. Уплотнение грунтов вибрационными катками: монография / И.С. Тюремнов, А.А. Игнатьев. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2012. – 140 с.
2. ГОСТ 22733-2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. – М.: Стандартинформ, 2016. – 11 с.
3. Пат. 2108570 Российская Федерация, G01N33/24, E02D3/00. Способ регулирования деформационных свойств дисперсного материала [Текст] / Придатко Ю.М., Шабров В.Л., Лебедев А.Б., Доброхотов В.Б., Басов А.Н., Шевырев А.А.; заявитель и патентообладатель: Ярославский государственный технический университет. – Оpubл. 10.04.98. – Бюл. № 10 – 3 с.
4. Пат. 2114247 Российская Федерация, E02D3/046, E02D3/10. Способ уплотнения грунта [Текст] / Придатко Ю.М.; Лебедев А.Б.; Шабров В.Л.; Доброхотов В.Б.; Метелева Л.В.; Полякова В.Г.; заявитель и патентообладатель: Ярославский государственный технический университет. – Оpubл. 27.06.98. – Бюл. № 18 – 6 с.

### L I T E R A T U R A

1. Tjuremnov I.S. Uplotnenie gruntov vibracionnymi katkami: monografija / I.S. Tjuremnov, A.A. Ignat'ev. – Jaroslavl': Izd-vo JaGTU, 2012. – 140 s.
2. GOST 22733-2016. Grunty. Metod laboratornogo opredelenija maksimal'noj plotnosti. – M.: Standartinform, 2016. – 11 s.



3. Pat. 2108570 Rossijskaja Federacija, G01N33/24, E02D3/00. Sposob regulirovanija deformacionnyh svojstv dispersnogo materiala [Tekst] / Pridatko Ju.M., Shabrov V.L., Lebedev A.B., Dobrohotov V.B., Basov A.N., Shevyrev A.A.; zajavitel' i patentoobladatel': Jaroslavskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet. – Opubl. 10.04.98. – Bjul. # 10 – 3 s.
4. Pat. 2114247 Rossijskaja Federacija, E02D3/046, E02D3/10. Sposob uplotnenija grunta [Tekst] / Pridatko Ju.M.; Lebedev A.B.; Shabrov V.L.; Dobrohotov V.B.; Meteleva L.V.; Poljakova V.G.; zajavitel' i patentoobladatel': Jaroslavskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet. – Opubl. 27.06.98. – Bjul. # 18 – 6 s.

---

**IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF COMPACTING  
NON-COHESIVE SOILS BY MEANS OF REGULATION OF  
INTERFACIAL INTERACTION OF PARTICLES**

*Ph. D. (Tech.), Associated Professor A.A. Ignatyev,  
Engineer G.V. Prenglaev  
(Yaroslavl State Technical University)  
Contact information: ignatyevaa@ystu.ru;  
prenglaev@gmail.com;  
89109637334;  
8(4852) 44-03-67*

*The research results aimed at improving compacting efficiency of non-cohesive soils by regulating the interfacial interaction of particles are considered. The effectiveness of compaction of non-cohesive soils at the optimum humidity is proved by determining the duration of conditioning the soil with water over time. The possibility of achieving higher dry density indices is confirmed by the research results. The proposed methodology can be successfully implemented in practice when soil compacting.*

**Key words:** road, soil, degree of compaction, optimum moisture content, density, mineral grain.

---

Рецензент: д-р техн. наук А.М. Кулижников (ФАУ «РОСДОРНИИ»).  
Статья поступила в редакцию: 26.03.2018 г.