

Научная статья
УДК 625.7/.8

Основные методы контроля степени уплотнения грунтов

Андрей Владимирович Илюхин¹, Сергей Вячеславович Борисов², Яков Васильевич Лазукин³

^{1,2,3}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹aviluhin@mail.ru

²teormeh@madi.ru

³jackerneet@gmail.com

Аннотация. В статье описаны методы определения плотности грунта такие, как метод режущего кольца, радиационные методы, объемно-весовой и метод пробного динамического нагружения грунта. Проведен краткий сравнительный анализ этих методов контроля уплотнения грунта с целью определения из их числа наиболее точного и эффективного. Были рассмотрены различные приборные реализации рассматриваемых методов контроля, обеспечивающие максимальную точность измерений и автоматизирующие определение плотности грунтов такие, как гамма-плотномер, нейтронный индикатор влажности, жесткий штамп, денситометр. Были выбраны наиболее точные и эффективные методы из рассмотренных.

Ключевые слова: сравнительный анализ, грунт, методы контроля, метод режущего кольца, радиационные методы, гаммаскопический метод, метод рассеянного гамма-излучения, гамма-плотномер, нейтронный индикатор влажности, метод пробного динамического нагружения грунта, объемно-весовой метод, жесткий штамп, денситометр.

Для цитирования: Илюхин А.В., Борисов С.В., Лазукин Я.В. Основные методы контроля степени уплотнения грунтов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №1(35).

Original article

Basic methods for control of the degree of soil compaction

Andrey V. Ilyukhin¹, Sergey V. Borisov², Yakov V. Lazukin³

^{1,2,3}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

¹aviluhin@mail.ru

²teormeh@madi.ru

³jackerneet@gmail.com

Abstract: The article describes methods for determining soil density, such as the cutting ring method, radiation methods, volume-weight and the method of trial dynamic loading of soil, and a brief comparative analysis of these methods for controlling soil compaction is carried out in order to determine the most accurate and effective of them. Various instrumental implementations of the control methods under consideration were considered, which provide maximum measurement accuracy and automate the determination of soil density, such as a gamma densitometer, a neutron moisture indicator, a rigid stamp, and a densitometer. The most accurate and effective methods from those considered were selected.

Key words: comparative analysis, soil, control methods, cutting ring method, radiation methods, gammascopic method, scattered gamma radiation method, gamma densitometer, neutron moisture indicator, soil dynamic test loading method, volume-weight method, hard punch, densitometer.

For citation: Ilyukhin A.V., Borisov S.V., Lazukin Ya.V. Basic methods for control of the degree of soil compaction. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №1 (35).

Введение

Физико-механические свойства естественных грунтов значительно отличаются друг от друга в разных регионах и даже в пределах одного региона. Для обеспечения высокого качества земляных и строительных работ возникает необходимость в их уплотнении [3]. Поэтому в процессе строительства грунты уплотняют в различных условиях – на площадях, в насыпях, в траншеях, котлованах и т. д. В настоящее время на земляные работы приходится значительная доля в общем объеме затрат в транспортном, гидроэнергетическом и других видах строительства [1]. От качества проведения этих работ и от строгости и полноты контроля за их выполнением во многом зависит качество и долговечность всего объекта строительства [4]. Особенно это заметно в случае автомобильных дорог, где низкая плотность уплотненного грунта приводит к снижению долговечности и ускоренному образованию дефектов дорожного полотна [2]. В данной статье рассматриваются и сравниваются между собой методы, использующиеся для контроля степени уплотнения грунта с целью

определения наиболее эффективного из них с точки зрения трудозатрат, но в то же время обеспечивающие достаточную точность контроля в сочетании с минимальными временными затратами.

Обзор методов, используемых для измерения плотности грунтов

При возведении земляного полотна автомобильных дорог и железнодорожных путей (как наиболее значительных по объёму земляных работ), качество уплотнения грунта земляного полотна измеряется на контрольных постах и в полевых лабораториях. Контрольные посты организуются для определения плотности грунтов непосредственно во время возведения земляного полотна, контроля послойной отсыпки грунта по всей ширине насыпи, обеспечения оптимальной толщины уплотняемого слоя грунта и мониторинга других характеристик [5]. Полевые лаборатории устанавливают оптимальный режим работы уплотняющих машин, определяют требуемую плотность грунта на участках строительства и контролируют ее изменение в процессе земляных работ.

Качество уплотнения определяют методом сравнения полученных значений с теми значениями, которые соответствуют требуемой плотности в соответствии с задачами строительства. Уплотнение считают отличным, если 90 % контрольных образцов имеют коэффициент уплотнения грунта земляного полотна не ниже требуемого значения, а 10 % образцов показали отклонение не более 0,02 в сторону понижения от требуемого значения; хорошим – если у 90 % образцов коэффициент уплотнения грунта не ниже требуемого значения, у 5 % образцов отклонение в сторону понижения не превышает 0,02 от требуемого значения, а оставшиеся ещё 5% образцов содержат отклонение не превышающее 0,04 от требуемого значения. Уплотнение считают удовлетворительным, если у 90 % испытуемых образцов коэффициент уплотнения грунта не ниже требуемого значения, а у 10 % образцов отклонение в сторону понижения не превышает 0,04 от требуемого значения.

Рассмотрим методы контроля плотности грунтов, используемые средства измерения, а также их отличительные особенности, преимущества и недостатки.

Метод определения плотности грунта выбирается, исходя из его состава и свойств, акцентировав внимание на крупнообломочных грунтах, имеющих наибольшее применение при строительстве дорожного полотна и насыпей железнодорожных путей. Для определения плотности таких грунтов применяются следующие методы: метод режущего кольца, радиационный гаммаскопический метод, метод рассеянного гамма-излучения, метод пробного динамического нагружения грунта через жёсткий штамп и объёмно-весовой метод, как базовый ГОСТовский.

Метод режущего кольца является весьма распространенным и часто применяется во время дорожного строительства. Он основан на изъятии кернов с помощью стального цилиндра объёмом около 500 см^3 , который открыт с обоих концов. При отборе проб цилиндр ставят режущей кромкой на зачищенную поверхность и постепенно вдавливают в грунт при помощи специального приспособления. При извлечении получают керн, который используется для анализа уплотнения. Такой метод отличается простотой, что обуславливает частоту его применения, однако является весьма трудоемким ввиду того, что для определения плотности требуется информация о влажности керна, на определение которой требуется значительное время. Также этот метод имеет ограниченное применение при большом разбросе размеров гранулометрического состава керна, что имеет место в случае крупнообломочных грунтов ввиду того, что вдавить цилиндр в такой грунт весьма сложно, поскольку режущая кромка может попасть на крупный обломок. Ну и наконец после вытягивания керна образуются «лунки» в уплотненном грунте, которые надо засыпать и уплотнять [10]. Все перечисленные выше особенности метода снижают его оперативность, а в некоторых случаях делают его практически нереализуемым.

При радиационном гаммаскопическом методе грунт, заключённый между источником и детектором излучения, просвечивают широким пучком гамма-излучения. Детектор регистрирует прямое и рассеянное излучения. В случае метода рассеянного гамма-излучения детектор и источник разделены свинцовым экраном из-за чего детектор регистрирует лишь рассеянное гамма-излучение. Детектор регистрирует излучение прошедшее через грунт, величина которого зависит от плотности грунта, активности радиационного элемента и расстояния между источником и детектором. Ввиду этого для измерения плотности грунта могут быть использованы конкретные устройства, имеющие заранее известный элемент и длину между источником и детектором, которые дают однозначную зависимость между интенсивностью излучения и плотностью грунта.

Метод рассеянного гамма-излучения применим для определения плотности очень тонких ($5 \div 15$ см) поверхностных слоёв грунта при расположении источника и детектора на его поверхности. Отсутствие нарушения структуры грунта является преимуществом, однако для подобных плотномеров важна точная калибровка и точное расположение, так как даже минимальная прослойка воздуха между устройством и землей вносит погрешность в определение плотности. Ввиду этого для плотномеров требуется идеально ровная площадка. Использование таких плотномеров для определения плотности глубинных слоев грунта возможно при измерении в скважинах.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает два типа радиоизотопных приборов, предназначенных для измерения плотности материала: поверхностный гамма-плотномер ППГ-2 и глубинный гамма-плотномер ГГП-2. Принцип действия обоих приборов основан на методе рассеяния гамма-излучения. Эти приборы состоят из двух функциональных блоков (рис. 1): пересчётного устройства, типа ПМ-2 с декартонным индикатором и электромеханическим счётчиком с блоком детектирования,

который, в свою очередь, состоит из эталона-контейнера и зонда, в котором размещены цезиевый источник гамма-излучения, экран-разделитель из свинца и комплекс газоразрядных счётчиков-детекторов типа СБМ-20. Зонд прибора, установленный на поверхности грунта или введённый в скважину, реагирует на интенсивность рассеянного излучения и вырабатывает пропорционально ему электрические импульсы. Импульсы через соединительный кабель поступают в пересчётное устройство и вызывают последовательное срабатывание пересчётных триггерных ячеек, запускающих электромеханический счётчик. Показания электромеханического счётчика являются исходными данными для определения плотности влажного грунта по калибровочной зависимости.

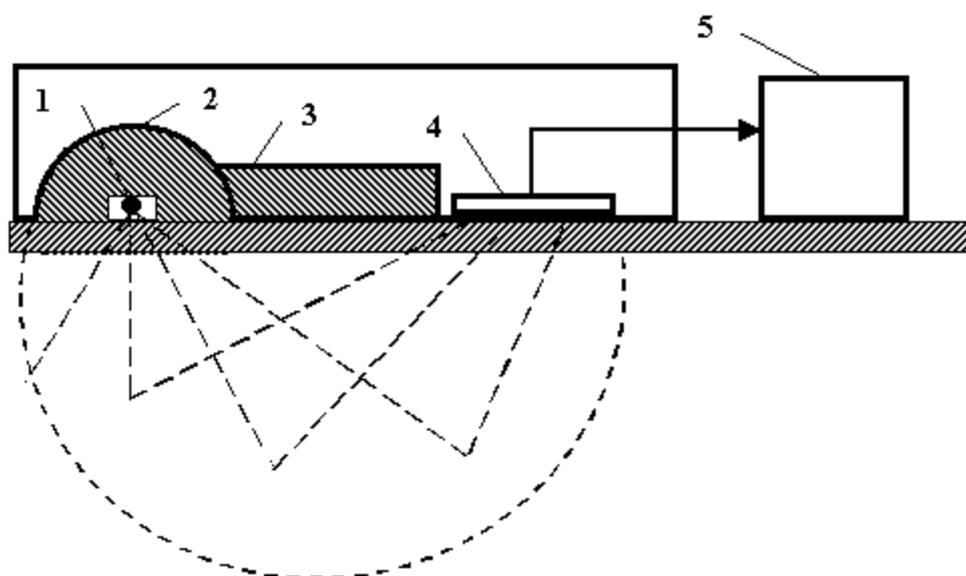


Рис. 1. Структурная схема плотномера ППГ-2. 1 – источник гамма-излучения, 2 – эталона-контейнера, 3 – экран-разделитель, 4 – газоразрядные счетчики, 5 – пересчётное устройство.

Наибольшее распространение среди плотномеров получил модернизированный гамма-плотномер ПГМ-1М, который используется для определения плотности поверхностного слоя грунта. Штырь плотномера, на нижнем конце которого установлен источник излучения, вводится в грунт. Приемник излучения остается на поверхности. В плотномере ПГМ-1М в

качестве источника излучения используется цезий-137. Приемник излучения состоит из восьми газоразрядных счётчиков типа. Для определения интенсивности гамма-излучения используется пересчётное устройство. Плотномер ППП-1М позволяет определять плотность грунта толщиной до 30 см. При определении плотности влажного грунта используют калибровочные зависимости. Для проведения одного измерения плотномером требуется не менее 5–6 минут.

Для определения плотности грунта необходима информация о его влажности, степень которой влияет на удельное сопротивление сдвигу почвы и разнится в разные периоды времени [9]. Влажность почвы можно установить с помощью измерителя нейтронного типа. Принцип действия такого измерителя основан на том, что быстрые нейтроны, испускаемые полонием и бериллием, не взаимодействуют с атомами минералов грунта, но замедляются вследствие взаимодействия с атомами водорода, которые содержит вода. Замедленные нейтроны диффундируют в грунте до тех пор, пока атомы водорода не поглотят их. Этот процесс сопровождается гамма-излучением, которое можно регистрировать.

Таким образом, радиационный контроль уплотнения грунта можно реализовать при помощи двух радиоизотопных приборов – гамма-плотмера и нейтронного влагомера. Использование этих приборов сопряжено с трудоемким процессом калибровки и настройки этих приборов, а также необходимостью расчетов по поправочным таблицам. Всё это замедляет измерительный процесс. Радиационный контроль позволяет осуществлять мониторинг плотности всех видов грунтов кроме крупнообломочных, составляющих значительную часть материалов, применяемых в дорожном строительстве. Следует отметить о присутствии психологического фактора, связанного с использованием радиоактивных материалов [10]. Зачастую рабочие отказываются использовать приборы

подобного типа, что препятствует их применению.

Метод пробного динамического нагружения грунта через жесткий штамп является одним из методов контроля крупнообломочного грунта. В конструкцию прибора, с помощью которого производится измерение, входит штамп площадью 700 или 1400 см², груз массой 39 кг и пружина высотой 80 см. Груз, падая на пружину, воздействует на грунт через штамп аналогично проезжающему автомобилю. После 20-25 раз прикладывания нагрузки измеряется величина осадки штампа, накопленная после многократного воздействия, которая является исходной величиной степени уплотнения [7]. Другим примером устройства, что использует метод динамического нагружения, является РДК (ручной динамический комплект) компании «Геотест». Для устройства требуется лунка глубиной 45 см и по меньшей мере трое человек, двое из которых будут поднимать и сбрасывать молот весом 30 кг на штамп. Измерение производится до тех пор, пока грунт не просядет на глубину 10 см, после чего производится измерение плотности [6].

Объемно-весовой метод основан на выкапывании лунок и засыпки их сухим песком для определения объема. Однако этот метод весьма трудоемкий и имеет ряд недостатков. На результат такого измерения влияют параметры самого песка, скорость и высота засыпки лунки песком, далее песок, засыпанный в лунку, впоследствии надо будет удалить для обеспечения однородности грунта. Всё это приводит к низкой точности измерения объема, повысить которую возможно при использовании денситометра – прибора, измеряющего объем лунок.

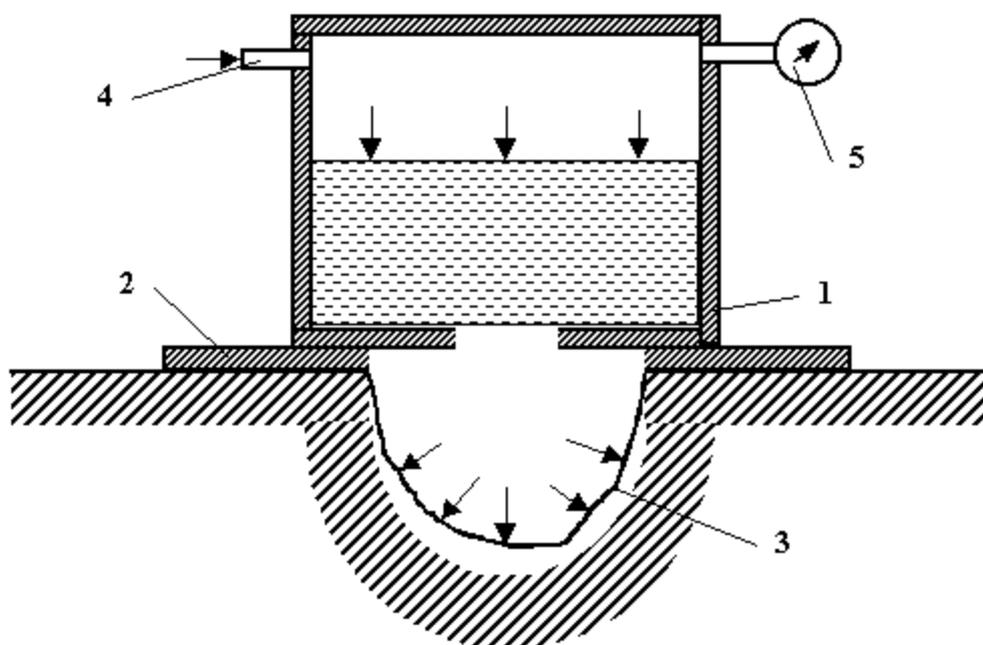


Рис. 2. Структурная схема денситометра. 1 – цилиндр, 2 – диск, 3 – диафрагма, 4 – труба для подачи насосом воздуха и заливки воды, 5 – манометр.

Выводы

Проведенный анализ методов измерения плотности обычных и крупнообломочных грунтов позволяет выделить два наиболее эффективных метода с точки зрения снижения трудоемкости работ и времени, затрачиваемого на измерения. Среди рассмотренных такими методами являются гаммаскопический и объемно-весовой методы.

Объемно-весовой метод является наиболее точным из рассмотренных, но характеризуется большой длительностью измерений и высокой трудоемкостью работ.

Гаммаскопический метод также обеспечивает высокую точность измерений, но сопряжен с использованием источника радиации, что препятствует его распространению.

Следует отметить, что все рассмотренные методы не позволяют проводить измерения без остановки процесса уплотнения грунтов.

Список источников

1. Пермяков, В.Б. Комплексная механизация строительства / В.Б. Пермяков. – М.: Высшая школа, 2015. – 459 с. – ISBN: 978-5-06-004887-2.
2. Дудаев, Д.З. Основы существующих методов контроля плотности грунтов / Д.З. Дудаев // Кронос: естественные и технические науки. – 2019. – Т. 26. – №4. – С. 30-32.
3. Махмутов, М.М. О качестве уплотнения грунтов земляного полотна / М.М. Махмутов, Р.Л. Сахапов // Известия КазГАСУ. – 2015. – Т. 32, №2. – С. 289-294. – С. 293-294.
4. Александрова, Н.П. Совершенствование методов экспресс оценки качества уплотнения грунтов земляного полотна строительства автомобильных дорог / Н.П. Александрова, Т.В. Семенова, К.Ю. Стригун // Вестник СибАДИ. – 2015. – Т. 44. – №4. – С. 46-57.
5. Зайцев, А.А. Результаты полевых испытаний слабых грунтов / А.А. Зайцев, В.Г. Офрихтер // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 24. – №2. – С. 56-65.
6. Седин, В.Л. Методика испытаний грунтов универсальным динамическим зондом лиатэ / В.Л. Седин, В.Ю. Ульянов, Е.А. Бауск, Я.В. Ульянов // Вісник ПДАБА. – 2016. – Т. 215. – №2. – С. 19-24.
7. Сазонова, С.А. Некоторые предпосылки применения динамического плотномера к определению модуля деформации грунта / С.А. Сазонова, А.Б. Пономарев // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 9. – №3. – С. 28-35.
8. Сазонова, С.А. Применение экспресс-методов для определения характеристик насыпных грунтов / С.А. Сазонова, С.Д. Румянцев // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8. – №3. – С. 113-120.
9. Сахапов, Р.Л. Экспериментальная модель влияния влажности и типа почв на удельное сопротивление сдвигу / Р.Л. Сахапов, М.М. Махмутов, М.М. Земдыханов // Известия КазГАСУ. – 2019. – Т. 39. – №1. – С. 286-293.
10. Яворский, О.В. Оценка качества производства работ по устройству верхних слоев покрытия автомобильных дорог неразрушающим методом / О.В. Яворский, С.А. Чернов, Н.И. Ширяев // Инженерный вестник Дона. – 2018. – Т. 48. – №1. – С. 131-138.

References

1. Permyakov V.B. *Kompleksnaya mekhanizaciya stroitel'stva* (Complex mechanization of construction), Moscow, Vysshaya shkola, 2015, 459 p.
2. Dudayev. D.Z. *Kronos: natural and technical sciences*, 2019, no. 4, pp. 30-32.
3. Makhmutov M.M., Sakhapov R.L. *Izvestia KazGASU*, 2015, no. 2, pp. 289-294.
4. Aleksandrova N. P., Semenova T. V., Strigun K. Yu. *Vestnik SibADI*, 2015, no. 4, pp. 46-57.
5. Zaitsev A.A., Ofrichter V.G. *Vestnik of PNRPU. Stroitelstvo i Arhitektura*, 2019,

но. 2, pp. 56-65.

6. Sedin V.L., Ulyanov V.Yu., Bausk E.A., Ulyanov Ya.V. *Vistnik PDABA*, 2016, no. 2, pp. 19-24.

7. Sazonova S.A., Ponomarev A.B. *Vestnik PNRPU. Stroitelstvo i Arhitektura*, 2018, no. 3, pp. 28-35.

8. Sazonova S.A., Rumyantsev S.D. *Vestnik of PNRPU. Stroitelstvo i Arhitektura*, 2017, no. 3, pp. 113-120.

9. Sakharov R.L., Makhmutov M.M., Zemdikhanov M.M. *Izvestia KazGASU*, 2019, no. 1, pp. 286-293.

10. Yavorsky O.V., Chernov S.A., Shiryayev N.I. *IVD*, 2019, no. 1, pp. 131-138.

Рецензент: Г.В. Кустарев, канд. техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Илюхин Андрей Владимирович, д-р техн. наук, проф., МАДИ.

Борисов Сергей Вячеславович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Лазукин Яков Васильевич, инженер, МАДИ.

Information about the authors

Ilyukhin Andrey V., Dr. Sc., professor, MADI.

Borisov Sergey V., Ph.D., associate professor, MADI.

Lazukin Yakov V., engineer, MADI.

Статья поступила в редакцию 17.02.2023; одобрена после рецензирования 24.03.2023; принята к публикации 27.03.2023.

The article was submitted 17.02.2023; approved after reviewing 24.03.2023; accepted for publication 27.03.2023.