

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

<https://doi.org/10.17816/transsyst627482>

© Н.А. Федосеев, С.В. Алексеев, С.М. Шевченко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Россия)

ОБЗОР ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПОСЫЛОК К УПЛОТНЕНИЮ ГРУНТА

В настоящей статье проводится обобщение основных теоретических положений механики грунта и рассматривается формирование путей влияния свойств грунта на процесс его уплотнения. Указаны наиболее эффективные методы уплотнения грунтов в дорожном строительстве в зависимости от проявляемых ими свойств. Даны теоретические обоснования природы поведения грунта.

Ключевые слова: грунт; уплотнение грунта; земляное полотно; механика грунтов; свойства грунта; однородность грунта; связность грунта; влажность грунта.

Как цитировать:

Федосеев Н.А., Алексеев С.В., Шевченко С.М. Обзор теоретических предпосылок к уплотнению грунта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 200–214. doi: 10.17816/transsyst627482

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© **N.A. Fedoseev, S.V. Alekseev, S.M. Shevchenko**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

A REVIEW OF THE THEORETICAL PRECONDITIONS FOR SOIL COMPACTION

The article aims to summarize the fundamental theoretical principles of soil mechanics and identify effective methods for influencing soil properties during the compaction process. It highlights the most effective soil compaction techniques in road construction, tailored to specific soil properties. The article also provides theoretical explanations for the behavior of different types of soil.

Keywords: soil; soil compaction; roadbed; soil mechanics; soil properties; soil uniformity; soil connectivity; soil moisture.

To cite this article:

Fedoseev NA, Alekseev SV, Shevchenko SM. A review of the theoretical preconditions for soil compaction. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(2):200–214. doi: 10.17816/transsyst627482

ВВЕДЕНИЕ

Цель написания статьи – выделение свойств грунта, в наибольшей степени влияющих на процесс уплотнения. Кроме того, в статье дано сопоставление свойств грунта с численными характеристиками.

Рассматриваемые далее свойства относятся к нескальным (дисперсным) грунтам, как наиболее распространенным при возведении земляных сооружений. Таким образом, грунт в рамках данной работы представляет собой дисперсную среду, в которой могут присутствовать как механические, так и водно-коллоидные связи. В силу того, что строительство земляных сооружений чаще всего сопряжено с разработкой и перемещением грунта, наличие и влияние цементационных связей не учитывается. Значительное число связей данного типа нарушается в результате внешнего воздействия на грунт. Вместе с тем, в статье не рассматриваются специфические виды грунта, в том числе с выраженными цементационными связями (лессы, сильнозасоленные, шлаки и т.д.).

СВОЙСТВА ГРУНТОВОЙ СРЕДЫ

Для систематизации информации составлена схема, приведенная на Рис. 1. Вынесенные на схему свойства грунта выбраны как наиболее значимые при уплотнении. Относительно друг друга свойства распределены с учетом их склонности к изменению – вверху схемы приведены наименее подверженные изменению, а внизу – наиболее.

При этом деление свойств среды в зависимости от их природы не производится (физические, механические и т.д.)

СВЯЗНОСТЬ

Отношение конкретного грунта к связным или несвязным зависит от гранулометрического состава. При снижении размера фракций, слагающих грунт, а также при увеличении процентного содержания мелких фракций у грунтов активнее проявляются пластические свойства. Их влияние позволяет глинистым грунтам воспринимать растягивающие напряжения (например, формировать отвесный откос или переходить в текуче-пластичное состояние при увлажнении).

Связность грунтов объясняется силами молекулярного взаимодействия между частицами грунта и воды. Частицы грунта имеют отрицательный заряд, что доказано опытами с пропусканием электрического тока через суспензию – мелкие частицы перемещаются от анода (–) к катоду (+). Молекулы воды представляют собой диполи,

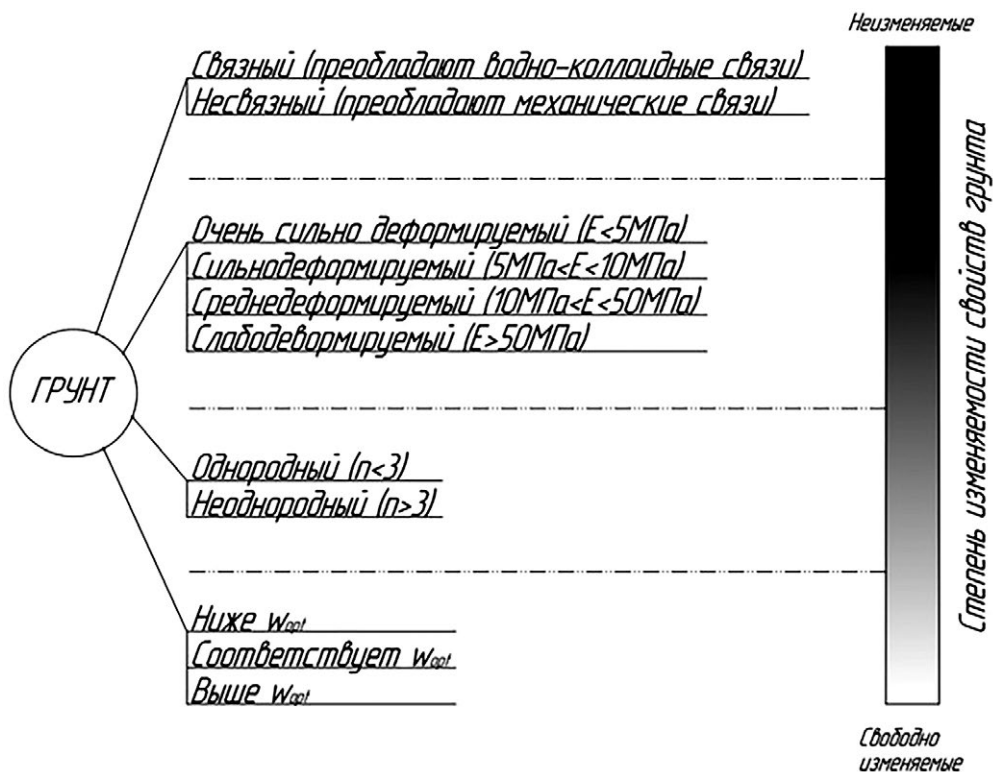


Рис. 1. Основные свойства грунта, влияющие на процесс уплотнения с учетом их изменчивости

Fig. 1. The main properties of the soil affecting the compaction process, taking into account their variability

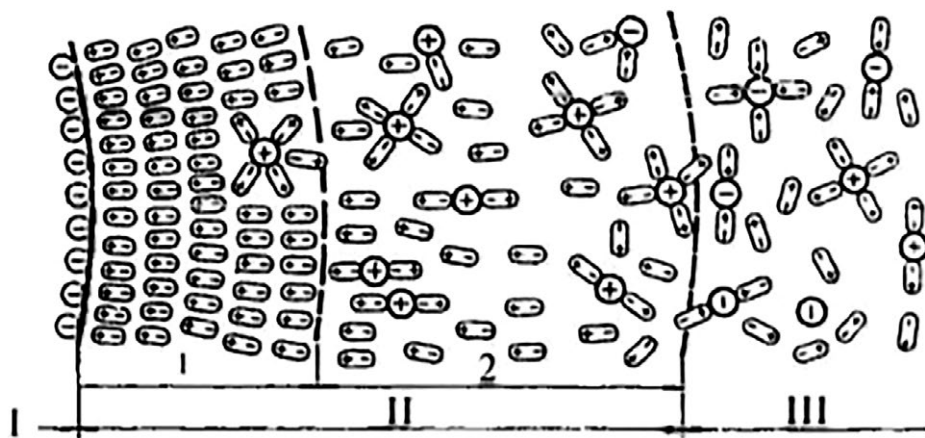


Рис. 2. Схема молекулярного взаимодействия частиц грунта с водой
I – твердая частица; II – связанная вода; III – свободная вода [1]

Fig. 2. Scheme of molecular interaction of soil particles with water
I – solid particle; II – bound water; III – free water [1]

несущие как положительные, так и отрицательные заряды. Таким образом, молекулы воды, расположенные в зоне влияния электромолекулярных сил частиц грунта, ориентируются к частице положительным зарядом и образуют слой связанной (пленочной) воды (Рис. 2). Этот механизм взаимодействия объясняет способность пленочной воды воспринимать касательные напряжения [1].

На количество связанной воды влияет суммарная площадь поверхности частиц грунта. Очевидно, что чем она больше, тем большая доля воды является связанной. Суммарная площадь частиц зависит от их размера и при уменьшении слагающих фракций возрастает. В результате этого песчаные и крупнообломочные грунты содержат крайне малое количество пленочной воды, не оказывающей влияния на их свойства. Глинистые грунты, наоборот, отличаются высокой долей содержания мелких фракций ($d \leq 0,002$ мм [2]) и, как следствие, значительным количеством пленочной воды. В силу того, что связанная вода может воспринимать касательные напряжения глинистые грунты обладают пластичностью.

На основании этого численной характеристикой связанности грунтов считается число пластичности:

$$I_p = w_L - w_p, \quad (1)$$

где w_L – предел текучести; w_p – предел пластичности.

В зависимости от значения I_p грунт является песком, супесью, суглинком, глиной.

С точки зрения восприятия внешних нагрузок, в том числе и от уплотняющих механизмов, глинистые грунты (связные) значительно отличаются от песчаных. В песчаных грунтах в наибольшей степени образуются механические связи в зонах контакта частиц друг с другом. Процесс уплотнения такой среды можно представить как взаимное движение частиц по площадкам скольжения [3]. Повышение плотности происходит за счет сдвиговых деформаций кластеров частиц с их последующей переупаковкой. Кластером можно считать группу частиц, внутри которой касательные напряжения меньше предельных, а на границе – больше.

Сдвиг кластеров происходит относительно наиболее крупных пор или зёрен, которые, в данном случае, являются концентраторами напряжения. В ходе этого процесса происходит циклическое движение

кластеров (изначально сдвиг относительно друг друга, далее сближение кластеров между собой за счёт доуплотнения мелких частиц на границах кластеров) с постоянным увеличением модуля деформации среды. Движение частиц приводит к срастанию отдельных кластеров в более крупные группы [4]. Уплотнение в данном случае происходит за счёт переупаковки частиц при разрушении и перестройке их механических связей друг с другом.

Стоит отметить, что при статическом способе нагружения между частицами достаточно быстро происходит взаимозаклинивание и для продолжения эффективного уплотнения необходимо обеспечить нарушение сложившихся связей путем увеличения статической нагрузки на грунт или использованием средств уплотнения с вибрационным воздействием [5].

Уплотнение глинистых грунтов энергетически более затратно, чем – песчаных [6]. При этом при одинаковых по величине вибрационных нагрузках глубина активной толщи грунта снижается [7]. Отличительной чертой глинистых сред является высокая степень влияния пленочной воды, имеющей большую прочность на сдвиг, и малые по радиусу, по сравнению с песчаными грунтами, поры. В связи с этим, для качественного уплотнения грунта необходимы большие контактные напряжения или большая контактная площадь уплотняющего органа с грунтом [8]. Для обеспечения повышения указанных параметров применяются катки большой массы (до 30 тонн), а также катки с кулачковыми или полигональными (см. Рис. 3) вальцами.

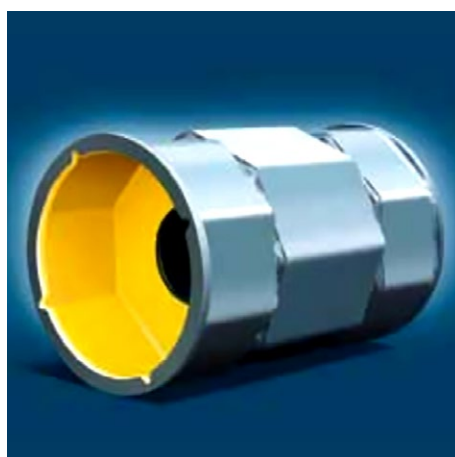


Рис. 3. Пример полигонального вальца [9]

Fig. 3. An example of a polygonal roller [9]

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

В зависимости от величины максимально воспринимаемых усилий грунты принято разделять на 4 группы (см. Рис. 1). Несущая способность грунта является механическим свойством и подразумевает способность воспринимать контактные напряжения без сдвигового разрушения. На Рис. 4 отображены круги Кулона-Мора. По ним определяются два основных показателя, характеризующие прочность грунта (способность сопротивляться сдвигу) – угол внутреннего трения, зависящий от сил сцепления и трения между частицами и сцепление грунта, зависящее от сил межмолекулярного взаимодействия частиц. Песчаные грунты сцеплением не обладают.

На Рис. 4 используются следующие обозначения: c – сцепление; φ – угол внутреннего трения; τ – касательные напряжения; σ_1 – предельное напряжение, направленное вертикально относительно образца грунта, при котором происходят незатухающие продольные деформации («раздавливание» образца); σ_2 – боковое давление на стенки грунтового керна, при котором при приложении вертикальной нагрузки σ_1 происходит «раздавливание» образца.

Из Рис. 4 видно, что чем большее боковое давление испытывает грунт, тем большие касательные напряжения он может воспринимать без разрушения.

Из сказанного выше следует, что для уплотнения грунтов нагрузка от уплотняющего средства не должна превышать предела прочности грунта. Несоблюдение данного условия ведет к незатухающим боковым деформациям и, как минимум, уплотнение грунта не осуществляется,

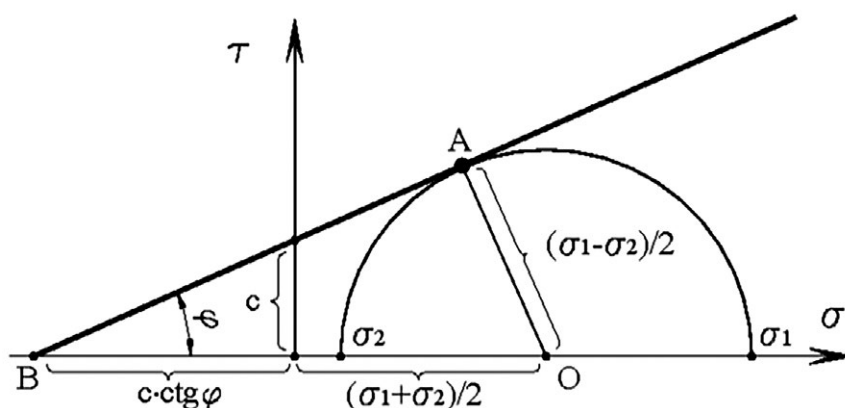


Рис. 4. Круги Кулона-Мора [10]

Fig. 4. Coulomb-Mohr circles [10]

а, как максимум, происходит его разуплотнение (примером разуплотнения может являться разрыхление верхнего слоя несвязного грунта при его уплотнении тяжелым кулачковым катком). При этом для эффективного уплотнения нагрузка от уплотняющих средств должна максимально приближаться к значениям прочности грунта.

Учитывая также, что прочность грунта зависит от бокового давления, а значит повышается в процессе уплотнения, необходимо следить за прикладываемыми усилиями, увеличивая их в ходе повышения плотности с помощью использования либо более тяжелых средств воздействия, либо путем добавления динамических нагрузок (например, вибрации).

Приведенные условия, из которых складываются прочностные показатели грунта, объясняют механизм работы песчаных свай и дренажей, применяемых на слабых и обводненных грунтах [11–13]. Сваи повышают боковое давление в прилегающем грунте, увеличивая таким образом несущую способность основания без применения укатки.

ОДНОРОДНОСТЬ

Гранулометрический состав грунта определяет его основные свойства. Так, грунты с выраженным наличием промежуточных фракций более склонны к уплотнению в результате сдвиговых деформаций. Кластеры грунтовых частиц, сдвигаясь по площадкам наибольших касательных напряжений, закрывают поры грунта. За счет наличия различных фракций поры, образуемые крупными частицами, заполняются более мелкими [14]. В ходе подобных сдвиговых деформаций происходит переупаковка частиц грунта, а массив грунта приобретает значительную осадку. Этот процесс характеризует основной этап уплотнения грунта.

В случае с однородным грунтом происходит быстрое накопление первичных деформаций в результате сближения частиц друг с другом и роста числа их взаимных контактов (этим характеризуется предварительный этап укатки, присущий как однородным, так и неоднородным грунтам в рыхлом состоянии). В дальнейшем деформативность однородного грунта резко снижается. Такой грунт перестает давать подвижку зерен друг относительно друга за счет быстро формирующегося жесткого скелета. Размер пор между зернами в этом случае соизмерим с самими зернами. Поры остаются ничем не заполнены, так как они хоть и сопоставимы с размерами частиц, но все же меньше [15]. Сравнительные фотографии поведения под статической нагрузкой однородного и неоднородного грунтов приведены на Рис. 5.

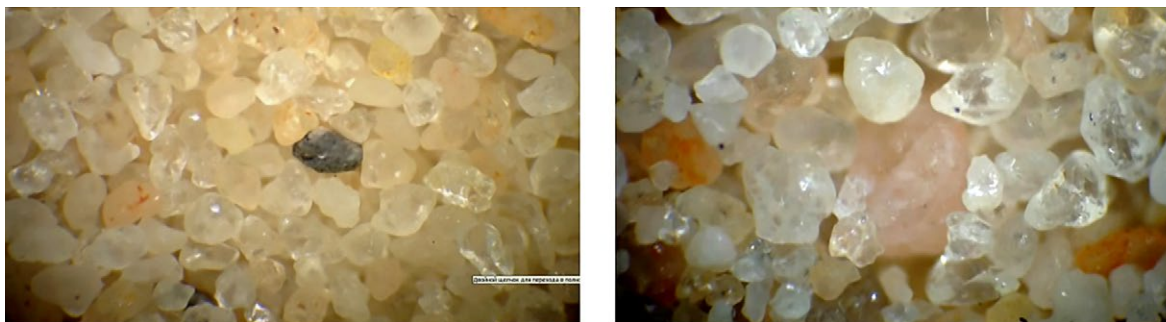


Рис. 5. Гранулометрический состав:
слева – однородный; справа – неоднородный [15]

Fig. 5. Granulometric composition:
homogeneous on the left; heterogeneous on the right [15]

Но несмотря на большую жесткость при статическом нагружении однородный грунт имеет меньшую прочность на сдвиг в сравнении с неоднородным (сопротивление сдвигу и однородность грунта находятся в коррелирующей зависимости [14]). Из Рис. 5 видно, что однородный грунт имеет возможность для переупаковки частиц в результате сдвига слоев частиц в горизонтальной плоскости. Подобные деформации характерны при динамическом воздействии.

Итогом особенностей однородного грунта является продолжительная затухающая во времени осадка насыпей под воздействием вибраций от проезжающего транспорта. При этом данный грунт трудноуплотним статическими воздействиями из-за высокой жесткости структуры скелета и сильными вибрационными воздействиями из-за слабого сопротивления сдвигу (при высоких прикладываемых вибрационных усилиях однородный грунт, наоборот, разуплотняется). Эффективным подходом к уплотнению однородных грунтов является использование легких уплотняющих средств в режиме слабой вибрации [16, 17].

ВЛАЖНОСТЬ

Влажность грунта оказывает значительное влияние на процесс уплотнения. В общем случае она может быть выше оптимальной, ниже оптимальной и равной оптимальной влажности. Понятие оптимальной влажности следует из метода определения максимальной плотности грунта, предложенного СоюздорНИИ [18, 19]. Оптимальная влажность грунта – влажность, при которой для уплотнения грунта до требуемых показателей необходимо затратить наименьшее количество работы. Способ

определения оптимальной влажности показан на Рис. 6. На пробу грунта при различных значениях влажности оказывается одинаковое силовое воздействие падающим грузом. В результате получается зависимость между влажностью грунта и его плотностью.

На Рис. 6 видно, что при первоначальном повышении влажности грунта от 0% до оптимальных значений происходит увеличение плотности. Это объясняется формированием пленочной воды, которая оказывает «смазывающий» эффект, снижения силы трения между частицами грунта [20, 21]. При дальнейшем повышении влажности плотность грунта

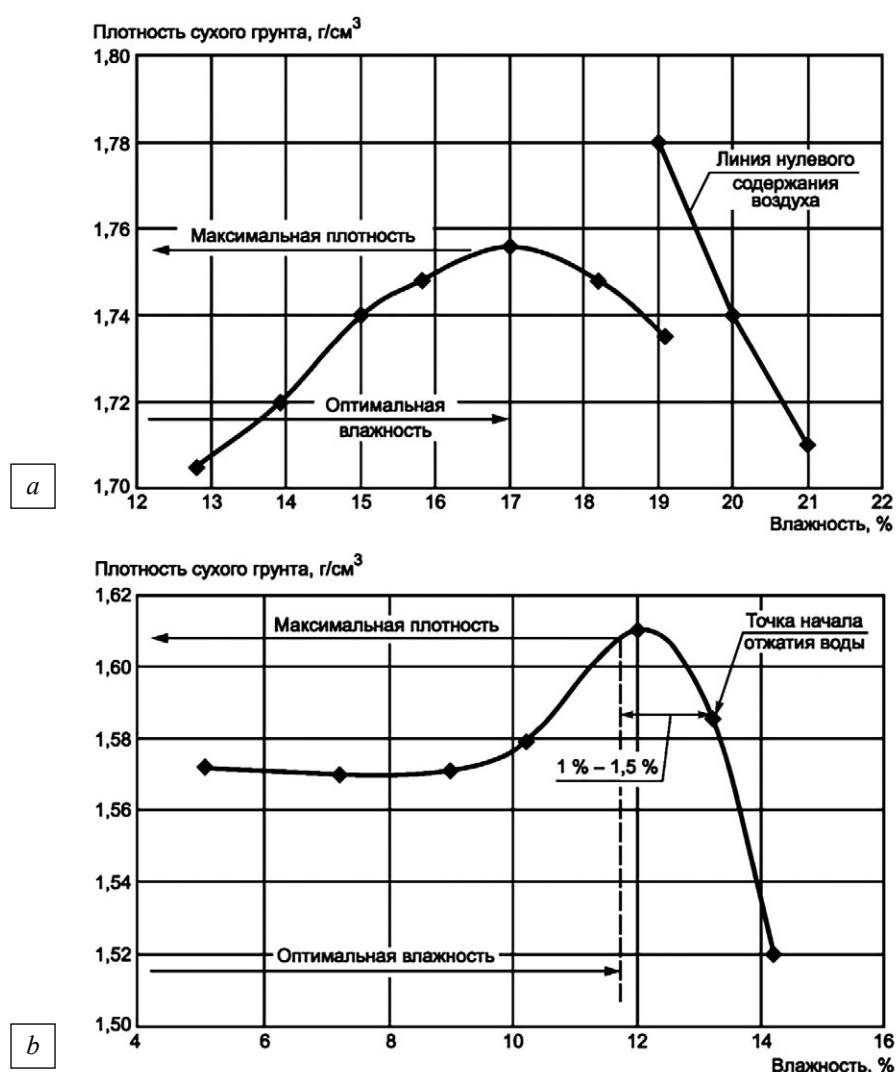


Рис. 6. Зависимость плотности грунта от влажности при стандартном уплотнении (а – для связного грунта; б – для несвязного) [19]

Fig. 6. Dependence of soil density on humidity with standard compaction (a – for cohesive soil; b – for non-cohesive) [19]

падает: для связных грунтов – вследствие взаимодействия пленочной воды различных частиц между собой (пленки воды отталкивают друг друга, раздвигая таким образом частицы и вызывая эффект разбухания грунта); для несвязных грунтов – вода, заполняя поры между частицами, в момент приложения нагрузки начинает воспринимать часть напряжений, разгружая таким образом скелет грунта, который испытывает меньшие напряжения и, как следствие, получает меньшее уплотнение (на Рис. 6, б данное состояние отмечено точкой начала отжатия воды).

Следует помнить, что показатели оптимальной влажности зависят от способа уплотнения пробы. Исследователи из СоюздорНИИ при разработке метода стандартного уплотнения основывались на том, что максимальные показатели плотности (коэффициент уплотнения равен 1), полученные в ходе испытания, соответствуют показателям грунта, находящегося в теле насыпи не менее 10 лет [22]. Данный метод определения максимальной плотности и, как следствие, оптимальной влажности, можно считать релевантным для всех случаев возведения насыпей, кроме верхней тонкой (0,2–0,3 м) части рабочего слоя насыпи на дорогах I категории в любых дорожно-климатических зонах и дорог любых категорий в дорожно-климатической зоне V. В указанном слое коэффициент уплотнения для защиты от процессов деформации или влагонакопления следует увеличивать до 1,0–1,05 [23, 24].

Для данного слоя характерно усиленное уплотнение, эффективность которого выше при значениях влажности немного меньшей оптимальной (оптимальная влажность определяется методом СоюздорНИИ). Однако, для проведения усиленного уплотнения необходимо использовать тяжелые уплотняющие машины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены основные свойства грунтов, оказывающие влияние на уплотнение. Дан обзор зависимости процесса уплотнения от степени проявления различных свойств. Приведены практические рекомендации.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бугров А.К. Механика грунтов: учеб. пособие. СПб.: СПбПУ, 2020.
2. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. Дата обращения: 20.02.2024. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293719/4293719820.pdf>
3. Тер-Мартirosян А.З., Анжело Г.О., Ермошина Л.Ю. и др. Влияние коэффициента неравномерности расширения грунтового образца на механические характеристики // Вестник МГСУ. 2023. № 18(10). С. 1574–1586. doi: 10.22227/1997-0935.2023.10.1574-1586
4. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Модель деформации микроструктуры песчаного грунта // Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 118 С. 853–877. EDN: VWPTMZ
5. Носов С.В. Математическое моделирование процесса уплотнения дорожно-строительных материалов жестким вальцом дорожного катка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 31–35. EDN: QCEJOT
6. Галдин Н.С. Грунтоуплотняющее оборудование на основе гидроударников // Вестник СиБАДИ. 2017. № 2(54). С.11–16. EDN: YRGNPJ
7. Костельов М.П. Возможности и эффективности виброкатков для уплотнения грунтов различного типа и состояния // Путевой навигатор. 2012. № 14(40). С. 60–71. EDN: ZQQITP
8. Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов: Теория, расчет и конструкции. Ленинград: Машиностроение, 1973.
9. Инструкция по эксплуатации грунтового катка фирмы BOMAG с полигональным вальцом. [Internet]. Дата обращения: 20.02.2024. Режим доступа: <https://specavto.ru/upload/iblock/968/968c611e2869c81fdea86a0b4757e711.pdf>.
10. Петраков А.А., Яркин В.В., Таран Р.А., Казачек Т.В. Механика грунтов: учеб. пособие. Макеевка: ДонНАСА, 2004.
11. Лямина А.А., Тетерядченко Т.Н., Деркач К.В. Укрепление слабых оснований дорожных насыпей грунтовыми текстильно-песчаными сваями. В кн.: Труды XII Международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности». 30-31 декабря 2020 года; Казань. Часть 1. Казань: ООО «Конверт», 2020. – С. 172–175. EDN: VXJJDU
12. Сонин В.В. Обзор технологий усиления слабых оснований дорожных насыпей // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 5–1. С. 104–107. EDN: VZEEKF
13. Алексеев С.И., Мирошниченко Р.В. Оценка закрепления основания методом пневмотрамбования щебеночно-цементной смеси // Известия петербургского университета путей сообщения. 2007. № 4(13). С. 88–97.
14. Потапов А.Д., Платов Н.А., Лебедева М.Д. Песчаные грунты (монография). Москва: МГСУ, 2009. Дата обращения: 20.02.2024. Режим доступа: <https://elima.ru/books/?id=7030>.
15. Мирный А.Ю., Гайков Е.А., Зубов А.О. Зависимость сжимаемости несвязных грунтов от степени однородности гранулометрического состава // Вестник

- Мордовского университета. 2016. № 1(26). С. 12-19. EDN: VNUFYB doi: 10.15507/0236-2910.026.201601.012-019
16. Чернова Н.А., Бирюков О.Р., Ермошин Н.А. Влияние стабилизирующих добавок из целлюлозы на свойства щебеночно-мастичного асфальтобетона. В кн.: Материалы всероссийской конференции «Неделя науки ИСИ». 26–30 апреля 2021 года; СПб: СПбПУ, 2021. С. 255–257. EDN: VJVYGS
 17. Костельов М.П. Опять о качестве и эффективности уплотнения различных грунтов современными виброкатками // Дорожная техника и технологии. 2008. С.40–47. Дата обращения: 20.02.2024. Режим доступа: <https://zaovad.ru/upload/file/2017/01/25/11-dorozhnaya-tehnika-2008-1-s40-47.pdf>
 18. Федосеев Н.А., Свальбова В.А., Алексеев С.В. Автоматизированный алгоритм составления картограммы фрезерования // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9. № 2. С. 66–82. doi: 10.17816/transsyst20239266-82
 19. ГОСТ 22733-2016. Метод лабораторного определения максимальной плотности. – М.: Стандартинформ, 2019. Дата обращения: 20.02.2024. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293753/4293753343.pdf>
 20. Spoor G., Godwin R.J. Soil deformation and shear strength characteristics of some clay soils at different moisture contents // Journal of Soil Science. 1979. Vol. 30, N. 3. P. 483–498. doi: 10.1111/j.1365-2389.1979.tb01003.x
 21. Доброгорская Л.В., Лазарев Ю.Г., Федотов В.В. Применение информационного моделирования при диагностике и обследовании мостовых сооружений. В кн.: Материалы Международной научно-практической конференции «Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия». 29–30 ноября 2018 года; Комсомольск-на-Амуре. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019. С. 223–227. EDN: UVKEFU
 22. Hu W., Jia X., Zhu X., et al. Influence of moisture content on intelligent soil compaction // Automation in Construction. 2020. Vol. 113. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103141
 23. Ермошин Н.А., Лазарев Ю.Г., Егошин А.М., Змеев А.Т. Управление инвестиционными и техническими рисками в дорожном строительстве (монография). СПб: ВА МТО, 2017.
 24. СП 34.13330.2021 Автомобильные дороги. М., 2021. Дата обращения: 20.02.2024. Режим доступа: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/119239/>

REFERENCES

1. Bugrov AK. *Soil mechanics: schoolbook*. St. Petersburg: SPbPU; 2020. (In Russ.)
2. GOST 25100-2020 *Soils. Classification*. Moscow: Standardinform, 2020. (In Russ.) Accessed: 20.02.2024. available from: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293719/4293719820.pdf>
3. Ter-Martirosyan AZ, Anzhelo GO, Ermoshina LYu, et al. Vliyanie koe`fficienta neravnomernosti rasshireniya gruntovogo obrazca na mexanicheskie karakteristiki. *Vestnik MGSU*. 2023;18(10):1574–1586. (In Russ.) doi: 10.22227/1997-0935.2023.10.1574-1586
4. Lyashenko PA, Denisenko VV. Model` deformacii mikrostruktury` peschanogo grunta. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2016;(118):853-877. (In Russ.) EDN: VWPTMZ

5. Nosov SV. Matematicheskoe modelirovanie processa uplotneniya dorozhno-stroitel'ny'x materialov zhestkim val'czom dorozhnogo katka. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013;(4):31–35. (In Russ.) EDN: QCEJOT
6. Galdin NS. Gruntouplotnyayushhee oborudovanie na osnove gidroudarnikov. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017;2(54):11–16. (In Russ.) EDN: ZQQITP
7. Kostel'ov MP. Vozmozhnosti i e'ffektivnosti vibrokatkov dlya uplotneniya gruntov razlichnogo tipa i sostoyaniya. *Putevoj navigator*. 2012;14(40):60–71. (In Russ.) EDN: ZQQITP
8. Kharkhuta NYa. *Mashiny` dlya uplotneniya gruntov: Teoriya, raschet i konstrukcii*. Leningrad: Mashinostroenie; 1973. (In Russ.)
9. Instrukciya po e'kspluatacii gruntovogo katka firmy` BOMAG s poligonal'ny'm val'czom. [Internet]. [cited 2024 Feb 20]. Available from: <https://specavto.ru/upload/iblock/968/968c611e2869c81fdea86a0b4757e711.pdf>
10. Petrakov AA, Yarkin VV, Taran RA, Kazachek TV. *Soil mechanics: schoolbook*. Makeevka: DonNASA; 2004. (In Russ.)
11. Lyamina AA, Teteryadchenko TN, Derkach KV. Ukreplenie slaby'x osnovanij dorozhny'x nasy'pej gruntovy'mi tekstil'no-peschany'mi svami. In: *Proceedings of the International Scientific Conference «Prioritetny'e napravleniya innovacionnoj deyatel'nosti v promy'shlennosti»*. 2020 Dec 30–31; Kazan. Kazan: Konvert; 2020:172–175. (In Russ.) EDN: VXJJDU
12. Sonin VV. Obzor tekhnologij usileniya slaby'x osnovanij dorozhny'x nasy'pej. *Aktual'ny'e problemy` gumanitarny'x i estestvenny'x nauk*. 2016;(5–1):104–107. (In Russ.)
13. Alekseev SI, Miroshnichenko RV. Ocenka zakrepleniya osnovaniya metodom pnevmotrambovaniya shhebenochno-cementnoj smesi. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2007;4(13):88–97. (In Russ.)
14. Potapov AD, Platov NA, Lebedeva MD. *Peschany'e grunty`* (monograph). Moscow: MGSU; 2009. (In Russ.) [cited 2024 Feb 20]. Available from: <https://elima.ru/books/?id=7030>
15. Mirny`j AYU, Gajkov EA, Zubov AO. Non-cohesive soils' compressibility and uneven grain-size distribution relation. *Mordovia university bulletin*. 2016;1(26):12–19. (In Russ.) EDN: VNUFYB doi: 10.15507/0236-2910.026.201601.012-019
16. Chernova NA, Biryukov OR, Ermoshin NA. Vliyanie stabiliziruyushchih dobavok iz cellyulozy na svoystva shhebenochno-mastichnogo asfal'ta. In: *Materials of the All-Russian conference «Nedelya nauki ISI»*. 2021 Apr 26–30. (In Russ.) EDN: VJVYGS
17. Kostel'ov MP. Opyat` o kachestve i e'ffektivnosti uplotneniya razlichny'x gruntov sovremenny'mi vibrokatkami. *Dorozhnaya texnika i tekhnologii*. 2008;40–47. (In Russ.) [cited 2024 Feb 20]. Available from: <https://zaovad.ru/upload/file/2017/01/25/11-dorozhnaya-tehnika-2008-1-s40-47.pdf>
18. Fedoseev NA, Svalbova VA, Alekseev SV. Automated algorithm for drawing up a milling cartogram. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):66–82. doi: 10.17816/transsyst20239266-82

19. GOST 22733-2016 Soils. Laboratory method for determining of maximum density. Moscow: Standardinform, 2019. (In Russ.) [cited 2024 Feb 20]. Available from: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293753/4293753343.pdf>
20. Spoor G, Godwin RJ. Soil deformation and shear strength characteristics of some clay soils at different moisture contents. *Journal of Soil Science*. 1979;30(3):483–498. doi: 10.1111/j.1365-2389.1979.tb01003.x
21. Dobrogorskaya LV, Lazarev YuG, Fedotov VV. Primenenie informacionnogo modelirovaniya pri diagnostike i obsledovanii mostovy`x sooruzhenij. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Regional`ny`e aspekty` razvitiya nauki i obrazovaniya v oblasti arxitektury`, stroitel`stva, zemleustrojstva i kadaстров v nachale III ty`syacheletiya»*. 2018 Nov 29–30; Komsomolsk-on-Amur. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-na-Amure State University; 2018:223–227. (In Russ.) EDN: UVKEFU
22. Hu W, Jia X, Zhu X, et al. Influence of moisture content on intelligent soil compaction. *Automation in Construction*. 2020;113. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103141
23. Ermoshin NA, Lazarev YuG, Egoshin AM, Zmeev AT. *Upravlenie investicionny`mi i texnicheskimi riskami v dorozhnom stroitel`stve* (monograph). St. Petersburg: VA MTO; 2017. (In Russ)
24. SP 34.13330.2021 Avtomobilnye dorogi. Moscow; 2021. (In Russ.) [cited 2024 Feb 20]. Available from: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/119239/>

Сведения об авторах:

Федосеев Никита Александрович, магистрант, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 6857-7057; ORCID: 0000-0001-6104-9674;
E-mail: fedoseev.na@edu.spbstu.ru

Алексеев Сергей Викторович, кандидат военных наук, доцент,
Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;
E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

Шевченко Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент,
Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 7734-1758; ORCID: 0000-0001-5244-8024;
E-mail: shef10b@yandex.ru

Information about the authors:

Nikita A. Fedoseev, master's degree student;
eLibrary SPIN: 6857-7057; ORCID: 0000-0001-6104-9674;
E-mail: fedoseev.na@edu.spbstu.ru

Sergey V. Alekseev, candidate of military sciences, associate professor,
eLibrary SPIN: 6013-0312; ORCID: 0000-0001-8632-3852;
E-mail: sergeyaleks1966@gmail.com

Sergey M. Shevchenko, candidate of technical sciences, associate professor,
eLibrary SPIN: 7734-1758; ORCID: 0000-0001-5244-8024;
E-mail: shef10b@yandex.ru