

Совершенствование методов оценки степени уплотнения грунтов

С.А. Уколов¹, В.А. Трепалин¹, А.С. Симонова², Л.Н. Викулова²

¹Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: В статье в качестве максимальной плотности предложено принять плотность частиц грунта, определение которой не требует наличия сложного оборудования, определяется в лаборатории с помощью пикнометра, при этом плотность частиц грунта является достаточно стабильной величиной, зависящей только от состава грунта. Приведена американская методика определения максимальной плотности и оптимальной влажности грунтов. В результате приведен более совершенный метод оценки степени уплотнения песчаных грунтов за счет использования в качестве максимальной плотности грунта плотности частиц грунта и статистических зависимостей без непосредственного определения в лаборатории максимальной плотности и оптимальной влажности грунта по ГОСТ 22733-2016. На основе исследований БелдорНИИ, в качестве максимальной плотности предложено принять плотность частиц грунта, определение которой не требует наличия сложного оборудования, определяется в лаборатории с помощью пикнометра, при этом плотность частиц грунта является достаточно стабильной величиной, зависящей только от состава грунта.

Ключевые слова: автомобильная дорога, грунт, уплотнение грунтов, состав грунта, дорожное покрытие, дефекты дороги, келейность, строительство дорог, метод, пикнометр.

Введение

Уплотнение почвы - это процесс, при котором частицы почвы механически обрабатываются с целью более плотного прилегания друг к другу за счет уменьшения воздушных пустот. Целью уплотнения земляных насыпей, таких, как земляные дамбы и насыпные насыпи (шоссе, железная дорога и канал), и дорожных участков является получение грунтовой массы, которая будет удовлетворять двум основным критериям: уменьшению осадки и увеличению прочности на сдвиг. Многие инженерные сооружения, построенные на грунтах, такие как автомобильные дороги, железнодорожное земляное полотно и покрытия аэродромов также требуют уплотнения [1]. Уплотнение повышает прочностные характеристики грунтов, что, в свою очередь, увеличивает несущую способность возводимых над ними фундаментов. Это также уменьшает количество нежелательных усадок сооружений и повышает устойчивость откосов насыпей. Уплотнение играет

жизненно важную роль в подготовке хорошего уплотненного грунтового покрытия на местах сбора отходов, чтобы сделать их относительно непроницаемыми для выщелачивания и тем самым снизить угрозу загрязнения грунтовых вод. Таким образом, уплотнение используется как практическое средство достижения желаемой прочности и сжимаемости, а также характеристик гидравлической проводимости используемых грунтов.

Характеристиками уплотнения грунта, полученными в результате лабораторных испытаний на уплотнение, являются максимальный удельный вес сухой массы и оптимальное содержание влаги. При строительстве многих земляных сооружений, таких как насыпи, важно оценить пригодность грунта с точки зрения характеристик уплотнения. Кроме того, для таких проектов требуется большое количество грунта, и может быть трудно получить одинаковый тип грунта на одном участке. Для получения характеристик уплотнения в лабораторных условиях требуется значительное время и усилие. Таким образом, для предварительной оценки пригодности грунтов, необходимых для проекта, предпочтительно использовать корреляцию инженерных свойств с простыми индексными тестами [2, 3].

В прошлом предпринимались попытки соотнести характеристики уплотнения с пределом текучести [4, 5]. Однако была получена неудовлетворительная корреляция.

Основная часть

При уплотнении грунта насыпная плотность увеличивается, а общая пористость уменьшается. Уплотнение на новых строительных площадках можно разделить на две категории – намеренное и преднамеренное. Преднамеренное (или предполагаемое по назначению) уплотнение производится для того, чтобы обеспечить физическую устойчивость грунта для сооружений.

Уплотнение почвы традиционно описывается как сжатие

ненасыщенного почвенного массива, приводящее к уменьшению фракционного объема воздуха [6]. Эффект уплотнения заключается в уменьшении общей пористости, особенно объема крупных пор между заполнителями. Как только объем воздуха уменьшается или почва насыщается, можно использовать термин "уплотнение". Уплотнение - это сжатие насыщенного грунта, вызванное выдавливанием воды. Консолидация - это более постепенный процесс, чем уплотнение, так как вязкость воды намного больше, чем воздуха.

Консистенция почвы (например, твердая, рыхлая) и уплотнение сильно зависят от уровня влажности. Очень сухая почва твердая и сопротивляется деформации, в то время, как более влажная рыхлая почва легко разрушается. Предел пластичности почвы - это весовое содержание воды, при котором почва превращается из рыхлой в пластичную, и представляет собой минимальное количество воды, при котором может произойти закупорка и образование луж.

Когда грунт подвергается уплотнению, начиная с сухого состояния, его насыпная плотность будет увеличиваться с увеличением влажности благодаря смазывающему эффекту частиц, пока не достигнет максимальной плотности почвы, которая будет наблюдаться при "оптимальной" влажности [7, 8]. Максимальная насыпная плотность (следовательно, максимальное уплотнение) соответствует ~80% степени насыщения. После насыщения частицы почвы раздвигаются еще больше, что снижает насыпную плотность. В стандартизированных условиях зависимость насыпной плотности от содержания воды в почве соотношение измеряется с помощью метода Проктора (ASTM Э 698-91) и варьируется в зависимости от текстуры и других свойств.

Для определения максимальной плотности грунта принят метод СоюздорНИИ (ГОСТ 22733-2016). Следует отметить, что данный метод

имеет ряд недостатков [9, 10]:

- трудоемкость,
- времязатратность,
- некоторые методические положения.

Теоретические предпосылки предлагаемого метода оценки степени уплотнения грунтов

Для устранения указанных недостатков предлагается в качестве максимальной плотности принять плотность частиц грунта, а степень уплотнения K_0 грунта определять по формуле [11]:

$$K_0 = \frac{p_d}{p_s}, \quad (1)$$

где p_d - плотность сухого грунта в слое насыпи, г/см³;

p_s - плотность частиц грунта, г/см³.

Определение p_s не требует сложного оборудования, определяется в лаборатории с помощью пикнометра или объемомера по ГОСТ 5180-2015.

Плотность частиц грунта является достаточно стабильной величиной, зависящей от состава грунта, и при отсутствии данных испытаний ориентировочно может быть принята равной, г/см³:

- для песков – 2,65;
- для супесей легких и легких пылеватых - 2,67;
- для супесей тяжелых, суглинков легких – 2,70;
- для суглинков тяжелых, глин–2,72.

Поскольку данные значения больше величины $p_{pd \text{ макс}}$ (p_s соответствует нулевой пористости), коэффициенты уплотнения K_y по стандартному методу будут больше коэффициентов K_0 по формуле (1). Для того, чтобы не менять принятую в дорожной практике шкалу нормируемых значений K_y приведем K_0 к действующей шкале.

Из отношения $K_y / K_0 = p_s / p_{pd \text{ макс}}$ следует, что:

$$K_y = K_o \left(\frac{\rho_s}{\rho_{d \text{ макс}}} \right) = K_o K_1, \quad (2)$$

т. е., для получения коэффициента уплотнения K_y необходимо K_o умножить на отношение $\frac{\rho_s}{\rho_{d \text{ макс}}} = K_1$. Отношение (1) установлено экспериментально в зависимости от фактической плотности грунта и представлено на рис. 1.

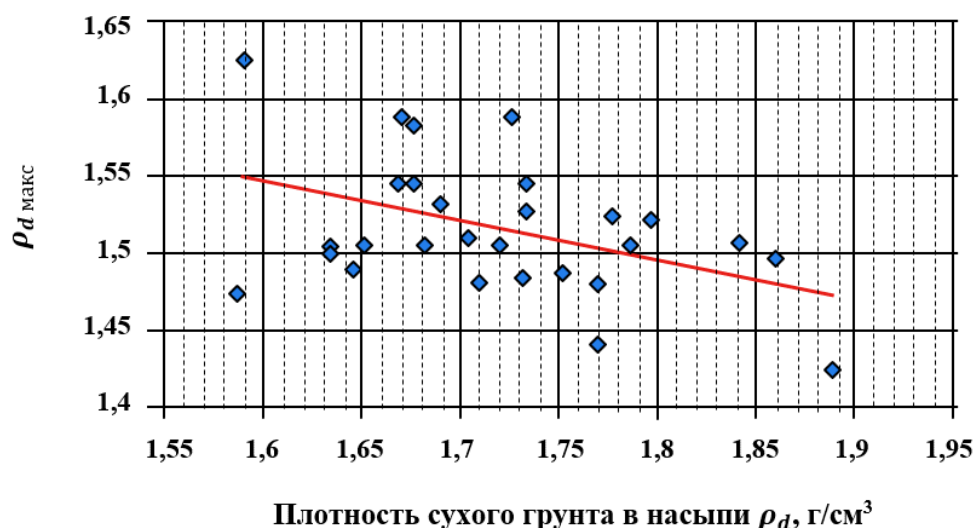


Рис. 1 – Зависимость $\frac{\rho_s}{\rho_{d \text{ макс}}} - \rho_d$

Зависимость $\frac{\rho_s}{\rho_{d \text{ макс}}} - \rho_d$, аппроксимируется следующей формулой:

$$\frac{\rho_s}{\rho_{d \text{ макс}}} K_1 = -0,258 \rho_d + 1,96, \quad (3)$$

Коэффициент корреляции этой зависимости равен 0,43.

Проведена оценка пригодности данной зависимости для приведения результатов определения коэффициента K_o к результатам испытаний по K_y . Для этого построен график «коэффициент уплотнения по корреляционной зависимости - фактический коэффициент уплотнения» (рис. 2). Оценка пригодности зависимости (3) проводилась путем определения коэффициента корреляции r , относительной ошибки δ/S и коэффициента вариации K_v .

Относительные ошибки δ/S определены как отношение разности значений коэффициентов уплотнения $\delta = K_{i\phi} - K_{iк}$, (фактических $K_{i\phi}$ и по корреляционной зависимости $K_{iк}$), к остаточному среднему квадратическому

отклонению указанных разностей S .

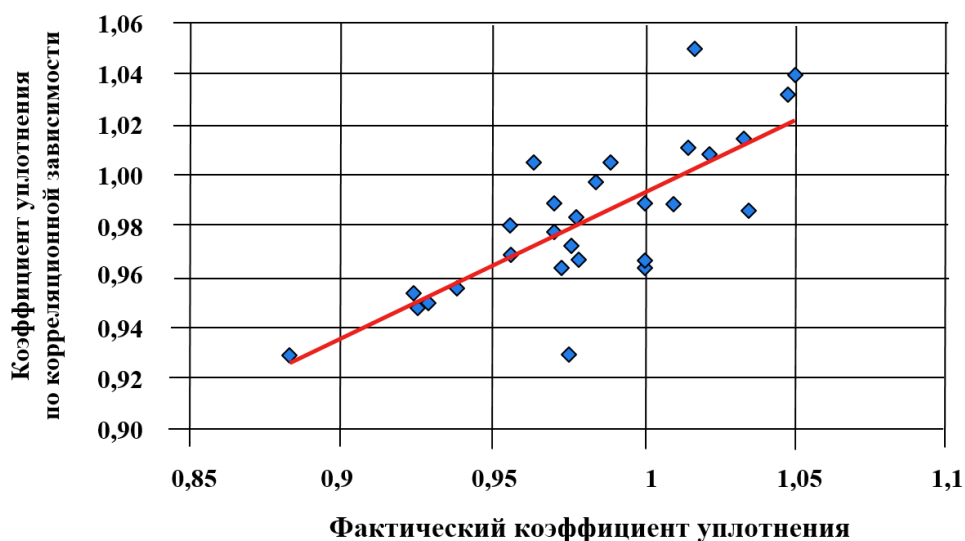


Рис.2 – Зависимость между фактическими и рассчитанными коэффициентами уплотнения

Коэффициент корреляции r между фактическими и рассчитанными по зависимости (2) коэффициентами уплотнения равен 0,756; остаточное среднеквадратическое отклонение разностей фактических и рассчитанных коэффициентов уплотнения $S=0,0268$; среднее значение K_y по корреляционной зависимости $K_y=0,982$ коэффициент вариации $K_v=0,02668/0,982=2,73\%$. Относительные ошибки δ/S изменяются в интервале $(-1,77 - +1,75)$ и не выходят за допустимый предел $\pm 2,0$ (рис.3).

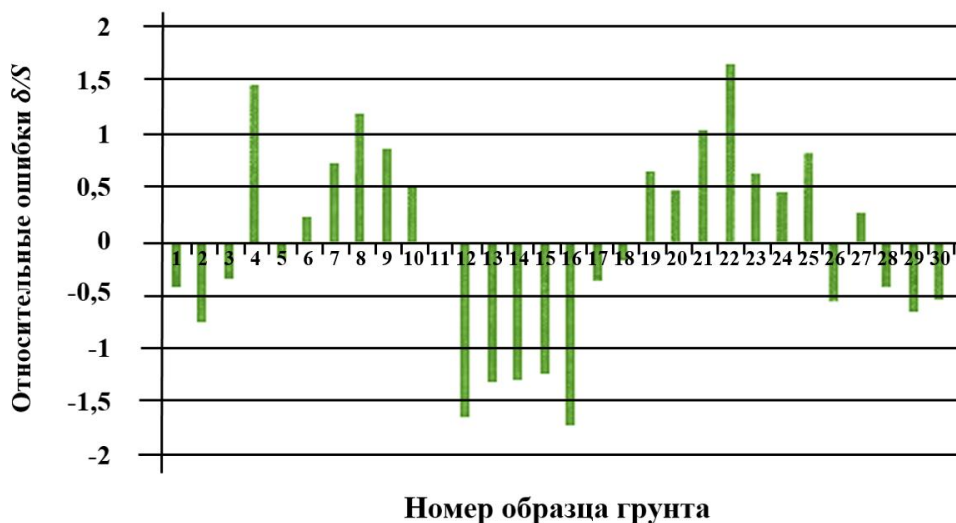


Рис.3 – Диаграмма относительных ошибок для приведенного коэффициента уплотнения K_y

Таким образом, недостатками метода стандартного уплотнения грунтов является прежде всего высокая трудоемкость и продолжительность испытаний по определению максимальной (стандартной) плотности грунта, а также ряд методических положений метода.

Заключение

В статье, на основе исследований БелдорНИИ, в качестве максимальной плотности предложено принять плотность частиц грунта, определение которой не требует наличия сложного оборудования, определяется в лаборатории с помощью пикнометра, при этом плотность частиц грунта является достаточно стабильной величиной, зависящей только от состава грунта. Проведена оценка пригодности данной зависимости для приведения результатов определения предложенного коэффициента уплотнения K_0 к результатам испытаний с определением коэффициента уплотнения K_y по традиционной методике.

Литература

1. Трепалин В.А., Уколов С.А., Викулова Л.Н., Симонова А.С. Метод обоснования состава комплекта сборно-разборных дорожных покрытий для обустройства временных автомобильных дорог // Инженерный вестник Дона, 2023, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2023/8435.
2. Уплотнение грунта при строительстве автодорог // URL: dom-srub-banya.ru/uplotnenie-grunta-pri-stroitelstve-avtodorog/ (дата обращения: 17.05.2023).
3. Хмелевцов А.А. Формирование структурных связей в аргиллитоподобных глинах сочинской свиты в г. Сочи // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2037.

4. Abid M., Lal R. Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration // Soil and Tillage research. 2009. V. 103. № 2. P. 364-372.
5. Allahyari N., Maleki M. Investigation into small-strain shear modulus of sand–gravel mixtures in different moisture conditions and its correlation with static stiffness modulus // International Journal of Geotechnical Engineering. 2022. V. 16. № 8. P. 962-973.
6. Håkansson I., Voorhees W. B. Soil compaction // Methods for assessment of soil degradation. CRC Press, 2020. P. 167-179.
7. Spoor G., Godwin R.J. Soil deformation and shear strength characteristics of some clay soils at different moisture contents // Journal of Soil Science. 1979. V. 30. № 3. P. 483-498.
8. Hu W., Jia X., Zhu X., Su A., Du Y., Huang B. Influence of moisture content on intelligent soil compaction // Automation in Construction. 2020. V. 113 URL: doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103141.
9. Горячев М.Г. Оценка ожидаемых значений модулей упругости глинистых грунтов при строительстве земляного полотна автомобильных дорог // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2020. № 2(24). С. 6.
10. Казаринов А.Е., Косицына К.Н. Сравнительный анализ методов определения максимальной плотности и оптимальной влажности грунтов // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения. 2019. Т. 19. С. 266-274.
11. Казарновский В.Д., Лейтланд И.В., Мирошкин А.К. Основы нормирования и обеспечения требуемой степени уплотнения земляного полотна автомобильных дорог. М.: Союздорнии, 2002. 55 с.

References

1. Trepalin V.A., Ukolov S.A., Vikulova L.N., Simonova A.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2023/843.



2. Uplotnenie grunta pri stroitel'stve avtodorog [Soil compaction during road construction]. URL: dom-srub-banya.ru/uplotnenie-grunta-pri-stroitelstve-avtodorog/ (accessed: 17.05.2023).
3. Khmelevtsov A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2037.
4. Abid M., Lal R. Soil and Tillage research. 2009. V. 103. № 2. pp. 364-372.
5. Allahyari N., Maleki M. International Journal of Geotechnical Engineering. 2022. V. 16. № 8. C. 962-973.
6. Håkansson I., Voorhees W. B. Soil compaction. Methods for assessment of soil degradation. CRC Press, 2020. pp. 167-179.
7. Spoor G., Godwin R.J. Journal of Soil Science. 1979. V. 30. № 3. pp. 483-498.
8. Hu W., Jia X., Zhu X., Su A., Du Y., Automation in Construction. 2020. V. 113. URL: doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103141.
9. Goryachev M.G. Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. 2020. № 2(24). p. 6.
10. Kazarinov A.E., Kositsyna K.N. Dal'niy Vostok. Avtomobil'nye dorogi i bezopasnost' dvizheniya. 2019. V. 19. pp. 266-274.
11. Kazarnovskiy V.D., Leytland I.V., Miroshkin A.K. Osnovy normirovaniya i obespecheniya trebuemoy stepeni uplotneniya zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog [Fundamentals of rationing and ensuring the required degree of compaction of the roadbed]. M.: Coyuzdornii, 2002. 55 p.