



УДК 625.7:624

**Махмутов М.М.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [maratmax@yandex.ru](mailto:maratmax@yandex.ru)

**Сахапов Р.Л.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [rustem@sakhapov.ru](mailto:rustem@sakhapov.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

## О качестве уплотнения грунтов земляного полотна

### Аннотация

От качества уплотнения зависят не только прочность, устойчивость, водонепроницаемость сооружения, но и ровность покрытия, срок его службы и безопасность движения.

По результатам статистической обработки была построена зависимость плотности распределения от коэффициента уплотнения. Плотность распределения рассматриваемых параметров грунтов подчиняется нормальному закону.

В результате анализа математических моделей установлено, что чем меньше степень увлажнения грунта, тем проще обеспечить повышенное значение коэффициента уплотнения: коэффициент уплотнения уменьшается с ростом коэффициента увлажнения (отношения естественной влажности грунта к оптимальной).

**Ключевые слова:** уплотнение, срок службы, суглинистые почвы, коэффициент распределения, коэффициент уплотнения, коэффициент увлажнения, грунт.

Уплотнение грунта – одна из важнейших операций в строительстве. От качества уплотнения зависят не только прочность, устойчивость, водонепроницаемость сооружения, но и ровность покрытия, срок его службы и безопасность движения. Недоуплотнение ведет к многочисленным повреждениям дорожных покрытий на новых дорогах, затраты на его осуществление составляют всего 0,7-1,0 % от общей стоимости дорожного строительства.

Механический состав почвы определяется по результатам анализа мелкозема, который делится на «физический песок» (размер частиц более 0,01 мм) и «физическую глину» – (размер частиц менее 0,01 мм). В зависимости от содержания «физической глины» почвы делят на:

- песчаные (песок) – содержание «физической глины» до 10 %;
- супесчаные (супесь) – 10...20 % «физической глины»;
- суглинистые (суглинок) – 20...50 % «физической глины»;
- глинистые (глины) более 50 % «физической глины».

При уплотнении получается плотная структура грунта, способная противостоять внешним воздействиям. В результате внешних силовых воздействий в уплотняемом материале накапливаются необратимые (остаточные) деформации, способствующие повышению его плотности [1, 2].

Вычислим координаты точки А, определяющий окончание первой и начало второй фаз, можно рассчитать коэффициент объемного смятия почвы.

По рис. 1. видно, что координата точки А определится величинами максимальной силы сопротивления и деформации почвы под штампом при максимальном значении сил сопротивления.

С целью определения вышеотмеченных параметров точки А, были проведены экспериментальные исследования на почвах с различным содержанием влаги и воздуха. В результате чего было установлено, что слои почвы, находящиеся под движущимся штампом, накладываясь друг на друга, образуют более уплотненное почвенное ядро, что способствует увеличению сил сопротивления (первая фаза). Достигнув определенной формы, размеров и плотности, ядро начинает раздвигать слои почвы, сохраняя свои параметры, перпендикулярно направлению движения штампа (вторая фаза).

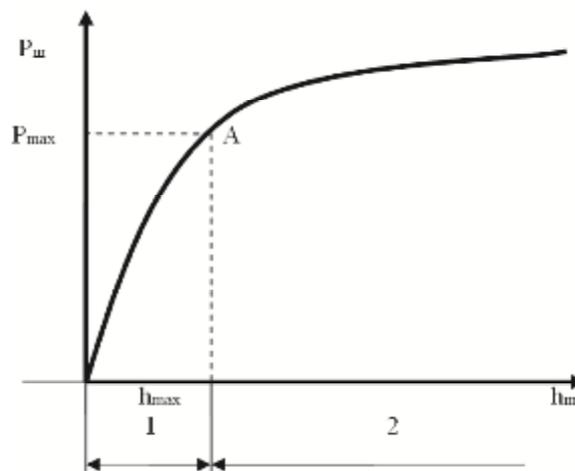


Рис. 1. Зависимость силы сопротивления почвы смятию от деформации

Физико-механические свойства грунтов, погодные условия, пористость, характеристики используемых технических средств, соблюдение технологии работ влияют на качество уплотнения грунта земляного полотна. Транспортно-эксплуатационные показатели автомобильной дороги определяет ее качество в целом.

Статистический анализ результатов уплотнения грунтов в насыпях реальных объектов на определенной территории и обоснование его на определенных районах более простой и достоверный способ получения необходимых данных.

Найдем пористость почвы [3] через объемы твердых частиц почвы, влаги и воздуха:

$$F_{II} = 1 - \frac{g_1 + g_2}{V_1 + V_2 + V_3} \cdot \frac{V_1}{g_1} = 1 - \frac{V_1 g_1 + V_1 g_1 W_o}{V_1 g_1 + V_2 g_1 + V_3 g_1} = 1 - \frac{V_1 (1 + W_o)}{V_1 + V_2 + V_3}, \quad (1)$$

где  $V_1, V_2, V_3$  – объем занятый соответственно твердыми частицами, водой и воздухом,  $m^3$ ;  $g_1, g_2$  – вес соответственно твердых частиц и воды в порах почвы, кг;

$W_o$  – относительная влажность почвы.

Пористость почвы можно выразить также через объемный вес (плотность) почвы:

$$F_{II} = \frac{\rho_{II}}{\rho_s} - \frac{\rho_w}{\rho_s} \cdot \frac{W_a}{1 + W_a} \quad \rho_{II} = \rho_s (1 - F_{II}). \quad (2)$$

Удельный вес почвы является показателем ее минералогического состава и определяется как пикнометрический. Для песков он составляет  $2500 \text{ кг/м}^3$ , а для глин –  $2800 \text{ кг/м}^3$ .

Выражая плотность почвы через весовые и объемные показатели ее фаз, получим:

$$\rho_{II} = \frac{g_1 + g_2}{V_1 + V_2 + V_3}. \quad (3)$$

Учитывая, что  $g_1 = \rho_s V_1$ ;  $g_2 = \rho_w V_2$ ;  $W_a = \frac{g_2}{g_1 + g_2}$ ;  $W_o = \frac{g_2}{g_1}$ ;  $g_2 = W_o g_1$

$$W_a = \frac{g_1 W_o}{g_1 + g_1 W_o} = \frac{W_o}{1 + W_o}; \quad W_a = W_o - W_a W_o = W_o (1 - W_a); \quad W_o = \frac{W_a}{1 - W_a}.$$

Получим:

$$\begin{aligned} g_2 = W_a (g_1 + g_2) &= W_a g_1 + W_a g_2; \quad W_a g_1 = g_2 - W_a g_2 = g_2 (1 - W_a); \\ g_1 &= \frac{g_2 (1 - W_a)}{W_a}; \quad \rho_{II} g_s V_1 = \frac{\rho_{II} V_2 (1 - W_a)}{W_a}; \\ V_1 &= \frac{\rho_w V_2 (1 - W_a)}{\rho_s W_a}; \quad V_2 = \frac{V_1 \rho_s W_a}{\rho_w (1 - W_a)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\rho_w$  – объемный вес воды,  $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_s$  – удельный вес почвы,  $\text{кг/м}^3$ ;

$W_a$  – абсолютная влажность почвы.

Подставляя формулы (3) в модель (4), получим:

$$g_{II} = \frac{g_s \cdot V_1 + g_w \cdot V_2}{V_1 + V_2 + V_3} = \frac{g_s \cdot V_1 + \frac{g_w \cdot V_1 \cdot g_s \cdot W_a}{g_w \cdot (1 - W_a)}}{V_1 + \frac{V_1 \cdot g_s \cdot W_a}{g_w \cdot (1 - W_a)} + V_3}; \tag{5}$$

$$F_{II} = 1 - \frac{1 + \frac{W_a}{1 - W_a}}{1 + \frac{g_s \cdot W_a}{g_w \cdot (1 - W_a)} + \frac{V_3}{V_1}}.$$

Для шара радиусом  $r_{ш}$  объединенного в сферические скопления радиусом  $R_1$  по  $l_{ш}$  элементов в каждом (рис. 2) и структуры почв, содержащей  $k$  уровней иерархии, характеристики почв определяются по выражению:

$$R_k = r_{ш} \cdot l^k; \quad V_{II} = V_{ш} \cdot l^{3 \cdot k}; \quad m_{II} = m_{ш} \cdot h^k;$$

$$g_{II} = \frac{m_{II}}{V_{II}} = \frac{m_{ш} \cdot h^k}{V_{ш} \cdot l^{3 \cdot k}} = g_s \cdot \frac{m_{ш} \cdot h^k}{m_{ш} \cdot l^{3 \cdot k}}; \quad \frac{g_{II}}{g_s} = \frac{h^k}{l^{3 \cdot k}}. \tag{6}$$

где  $R_k$  – радиус сферического скопления  $k$  уровня иерархии, м;  $V_{II}, V_{ш}$  – объем почвы и почвенной частицы, м<sup>3</sup>;  $m_{II}, m_{ш}$  – масса почвы и почвенной частицы, кг;  $g_{II}, g_s$  – плотность и удельный вес почвы, кг/м<sup>3</sup>;  $h_{ш}$  – количество почвенных частиц на данном уровне иерархии.

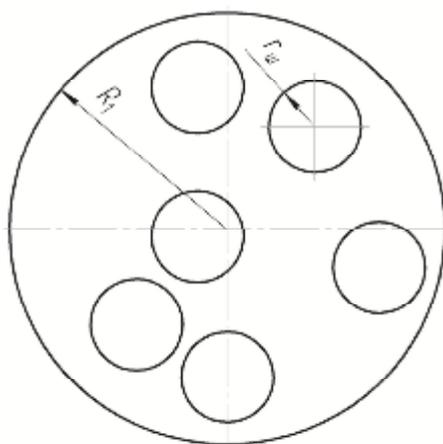


Рис. 2. Фрактальная модель структуры почвы

Следовательно, пористость почвы  $F_{II}$ , определится:

$$F_{II} = 1 - \frac{g_{II}}{g_s} \quad \text{и} \quad F_{II} = 1 - \frac{m_{ш} \cdot h^k}{m_{ш} \cdot l^{3 \cdot k}} = 1 - \frac{h^k}{l^{3 \cdot k}}.$$

Эксперимент был проведен в Апастовском районе Республики Татарстан, для этого использованы пробы различных грунтов. В г. Казани за год выпадает в среднем 480-550 мм осадков (в Апастовском, Буинском районах – 300-400 мм), в горных районах области – 600-700 мм, большое количество осадков выпадает летом.

Проводился контроль качества на основных дорожных объектах Республики Татарстан в период с 2009 по 2010 гг. Для испытания было взято 250 проб грунтов. Все средства измерений прошли поверку и аттестацию.

По результатам статистической обработки была построена зависимость плотности распределения от коэффициента уплотнения (рис. 3). Плотность распределения рассматриваемых параметров грунтов подчиняется нормальному закону.

Коэффициент уплотнения для разных регионов Республики составляет 0,89-1,14.

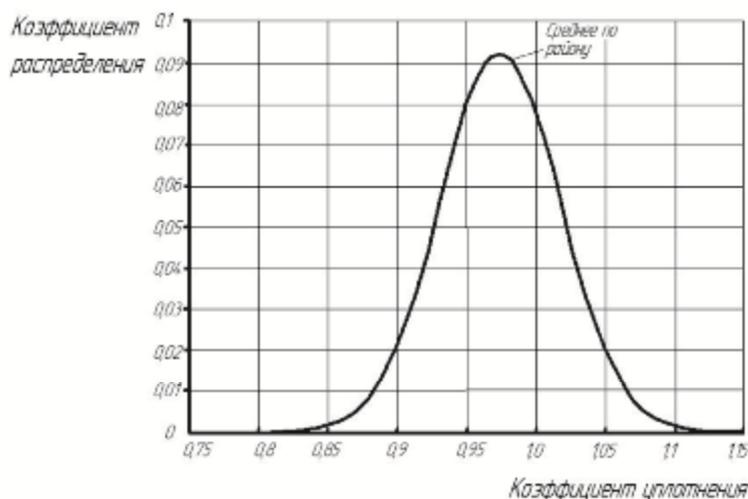


Рис. 3. Зависимость плотности распределения от коэффициента уплотнения

Для оптимизации процессов строительства земляного полотна важное значение имеет связь естественной и оптимальной (при которой с минимальными затратами на уплотнение достигается максимальная плотность) влажностью грунта. После обработки эксперимента получена следующая модель:

$$W_{\text{опт.}} = 0,4 \cdot W_a + 10,216. \quad (7)$$

Повышенная естественная влажность соответствует высоким значениям оптимальной влажности грунтов. При выпадении осадков, грунты с повышенной естественной влажностью далеко не всегда требуют просушки в весенний период.

Получена математическая модель для коэффициента увлажнения грунта:

$$K_y = 0,092 \cdot K_{\text{увлаж.}} - 1,24. \quad (8)$$

Математические модели (7) и (8) можно использовать для назначения мероприятий по увлажнению или просушке грунтов, прогноза ожидаемых показателей уплотнения.

ГОСТ регламентирует границы допустимого отклонения значений естественной влажности от оптимальной. Эти границы зависят от требуемой степени плотности и вида грунта. Нужно учитывать и абсолютные значения естественной влажности грунта [5]. Чем меньше степень увлажнения грунта, тем проще обеспечить повышенное значение коэффициента уплотнения (рис. 4): коэффициент уплотнения уменьшается с ростом коэффициента увлажнения грунта.

Если естественная влажность грунта имеет высокие значения, необходимо предусматривать более жесткие нормы операционного контроля и подтверждения соответствия. От максимальной плотности грунта и оптимальной влажности коэффициент уплотнения практически не изменяется.

Экспериментально получены зависимости статического модуля упругости грунта от его влажности и степени уплотнения, которые могут использоваться для получения расчетных значений динамических модулей упругости. В результате получим математическую модель (9):

$$E_z = -1732K_y^2 - 1420,23 - 54,9W + 4232K_y + 1,95W^2 - 15,38WK_y. \quad (9)$$

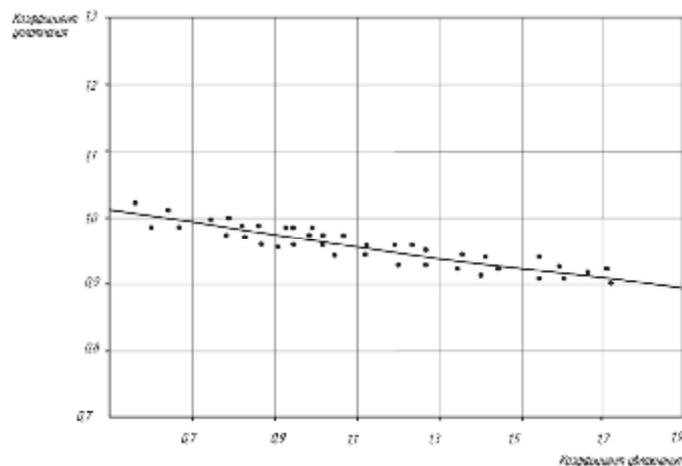


Рис. 4. Влияние коэффициента уплотнения на коэффициент увлажнения грунта

Проверка с помощью критерия Фишера и Стьюдента ( $F_t=2,30$ ) гипотезы ( $F_p=2,27$ ) адекватности модели (9) показала пригодность ее использования в качестве прогнозирования статического модуля упругости с доверительной вероятностью 95 %.

Математическая модель (9) справедлива при коэффициенте уплотнения 0,95-1,05 и влажности грунта 20-22 %, получена в результате испытаний среднего суглинка в данном районе.

По результатам исследования можно обоснованно назначать меры по обеспечению требуемой степени уплотнения глинистых грунтов земляного полотна автомобильных дорог и аналогичных сооружений, проектировать дорожные объекты и соответствующую технологию работ. Современные технические средства позволяют в массовом порядке достигать значений коэффициента уплотнения 1,0-1,1, без специальных мер (в т. ч. просушки или увлажнения грунта).

#### Список библиографических ссылок

1. Афиногенов А.О. Анализ технологических свойств глинистых грунтов юга // Вестник КузГТУ, 2009, № 3. – С. 121-124.
2. Бутузов Г.М. Принципы развития теории уплотнения и концептуальная модель формирования технологий уплотнения дорожно-строительных материалов // Вестник ВолгГАСУ. Сер. стр-во и архит., 2012, № 27 (46). – Волгоград. – С. 16-21.
3. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. – М.: Энергия, 1982. – 511 с.
4. Махмутов М.М. Аналитическая модель коэффициента объемного смятия почвы // Вестник Казанского государственного аграрного университета, 2008, № 4 (10). – С. 156-157.
5. Махмутов М.М., Славкин В.И. и др. Влияние параметров колесного движителя с устройствами противоскольжения на длину смятия почвы // Техника в сельском хозяйстве, 2010, № 5. – С. 27-30.
6. Махмутов М.М., Маланичев И.В. Теоретические аспекты влияния на сцепные свойства и уплотняющее воздействие параметров колесного движителя // Проблемы механизации сельского хозяйства: юбилейный сборник научных трудов / КГСХА. Факультет МСХ. – Казань, 2000. – С. 177-201.
7. Носов С.В., Минаков А.Ю. Анализ реологических моделей грунта // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета: В 2-х ч., Ч. 2. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012. – С. 5-7.
8. Орда А.Н. Исследование механики колееобразования и уплотнения почвы колесными движителями и обоснование требований к многоосным ходовым системам: Автореферат дис...канд. техн. наук. – Минск, 1978. – 14 с.

**Makhmutov M.M.** – candidate of technical sciences, senior lecturer

E-mail: [maratmax@yandex.ru](mailto:maratmax@yandex.ru)

**Sakhapov R.L.** – doctor of technical sciences, professor,

E-mail: [rustem@sakhapov.ru](mailto:rustem@sakhapov.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### About quality of compaction of soil subgrade

#### Resume

Quality of consolidation of soil of a road bed in many respects defines transport and operational indicators of the highway in general. Ensuring quality of consolidation of clay soil the present is carried out generally due to production control and management of technological processes.

By results of statistical processing dependence of density of distribution on coefficient of consolidation was constructed. Density of distribution of the considered parameters of soil submits to the normal law.

As a result of the analysis of mathematical models it is established that the extent of moistening of soil is less, the it is simpler to provide the increased value of coefficient of consolidation: the coefficient of consolidation decreases with growth of coefficient of moistening (the relation of natural humidity of soil to optimum).

**Keywords:** consolidation, service life, loamy soils, distribution coefficient, consolidation coefficient, moistening coefficient, soil.

#### Reference list

1. Afinogenov A.O. Analysis of technological properties of clay soil of the South // Messenger of KuzGTU, 2009, № 3. – P. 121-124.
2. Butuzov G.M. Principles of consolidation and development of the theory of conceptual model of sealing technology road-building materials // Bulletin VolgGASU. Ser. Build. and architect., 2012, № 27 (46). – Volgograd. – P. 16-21 .
3. Maslov N.N. Foundations of engineering Geology and soil mechanics. – M.: Energiya, 1982. – 511 p.
4. Makhmutov M.M. Analytical model of coefficient of by volume crumpling of soil // Announcer of the Kazan state agrarian university, 2008, № 4 (10). – P. 156-157.
5. Makhmutov M.M., Artyukhov V.I. The influence of the wheel mover with anti-skid devices on the length of the collapse of the soil // Technika v selskom khozayistve, 2010, № 5. – P. 27-30.
6. Makhmutov M.M., Malanichev I.V. Theoretical aspects of the influence on adhesion and sealing effect of the parameters of the wheel mover // Problems of agricultural mechanization: a jubilee collection of scientific papers / KGSA. Department of the Ministry of agriculture. – Kazan, 2000. – P. 177-201.
7. Nosov S.V., Minakov A.Yu. Analysis of rheological models of the soil // Collection of abstracts of scientific conference of students and postgraduates of the Lipetsk state technical University: In 2 p., P. 2. – Lipetsk: Edition lstu, 2012. – P. 5-7.
8. Orda A.N. The study of mechanics of cleopatras and soil compaction paddle wheels and justification of requirements for multi-axis handling systems: abstract of thesis...cand. tech. sciences. – Minsk, 1978. – 14 p.