

УДК 625.7/8

**Иван Иосифович ЛЕОНОВИЧ,**  
доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
"Строительство и эксплуатация  
дорог" Белорусского национального  
технического университета

**Николай Павлович ВЫРКО,**  
доктор технических наук,  
профессор Белорусского  
государственного  
технологического университета

**Сергей Степанович МАКАРЕВИЧ,**  
кандидат технических наук,  
профессор кафедры "Механика  
материалов и конструкций"  
Белорусского государственного  
технологического университета

**Тамара Казимировна  
БОГДАНОВИЧ,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры "Строительство  
и эксплуатация дорог"  
Белорусского национального  
технического университета

**Сергей Васильевич ЯРМОЛИК,**  
ассистент кафедры "Механика  
материалов и конструкций"  
Белорусского государственного  
технологического университета

## **ОПТИМАЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ И МАКСИМАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ — ОСНОВА ВЫСОКОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА**

### **OPTIMAL HUMIDITY AND MAXIMUM COMPACTNESS IS THE BASIS FOR ROADBED HIGH BEARING CAPACITY AND STABILITY**

*Несущая способность и устойчивость земляного полотна автомобильных дорог зависят от водно-теплового режима дорожной конструкции, физико-механических свойств используемых грунтов и особенно от их плотности, достигаемой в процессе строительства. Вопросам плотности грунтов земляного полотна в последние годы уделяется большое внимание. В технических нормативных правовых актах (ТНПА) установлены требования к плотности грунтов для различных категорий дорог. В условиях возрастающих транспортных нагрузок высокие требования к плотности земляного полотна имеют первостепенное значение.*

*В статье изложена теория уплотнения грунтов как трехфазной системы. Напряжения и перемещения в грунтах массива рассматриваются как квазиоднородное вязкоупругое полупространство. Установлено, по мере уплотнения грунта при многократном приложении внешних нагрузок происходит уменьшение как упругих, так и остаточных деформаций. По величине остаточной деформации можно судить о достигнутой плотности и, следовательно, обоснованно принимать расчетное ее значение.*

*Установлены зависимости коэффициента плотности от состава и свойств грунтов. Сформулированы предпосылки определения оптимальной толщины уплотняемого слоя в зависимости от величины уплотняющей нагрузки, характеристики грунта и его влажности; раскрыто влияние влажности грунта на прочностные его свойства; уточнены требования к плотности земляного полотна и даны предложения по их обеспечению.*

*The roadbed bearing capacity and stability depend on the water-thermal regime of the road structure, physical-mechanical properties of the soil and, particularly, its compactness reached during the construction process. Recently great attention is being paid to the problems of roadbed compactness. For different road categories the requirements to soil compactness were established in the technical normative-legal acts. The high requirements to road compactness are of paramount importance in growing traffic congestion.*

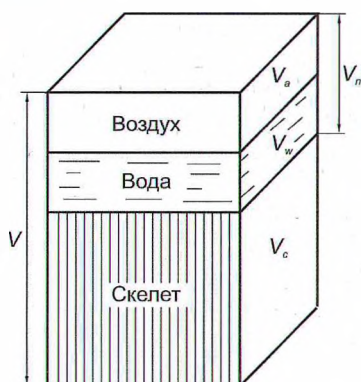
*The paper presents the soil compactness theory as a three-phase system. The earthmoving and stresses in the soil mass were considered as a quasi-homogeneous viscoelastic half-space. It was established that the elastic strains as well as residual strains decrease when compacting soil by applying outside loads repeatedly. By the residual strain value one can judge about the compactness reached and, subsequently, can assume its design value.*

*The dependence of the compactness coefficient on the soil composition and properties was determined. The preconditions for determining the optimal thickness of the compacted layer were formulated depending on the compacting load value, soil characteristics and humidity. The influence of the soil humidity on its strength characteristics was determined; the requirements to roadbed compactness were revised and suggestions for their realization were given.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Несущая способность и устойчивость земляных сооружений, включая насыпи и выемки, в значительной степени зависят от гранулометрического состава грунта, его влажности и плотности [1–3]. Гранулометрический состав грунта хорошо и легко поддается определению как в лабораторных, так и в полевых условиях. Но его механические свойства характеризуются наличием или отсутствием влаги, степенью уплотнения.

Для управления качеством земляного сооружения необходимо принимать меры по регулированию влажностного режима грунта и находить оптимальные решения в трехфазной системе — минеральные частицы, вода, воздух (рисунок 1).



$V$  — объем всей породы;  $V_c$  — объем скелета;  $V_n$  — объем пор;  $V_a$  — объем воздуха в порах;  $V_w$  — объем воды в порах

**Рисунок 1.** Схема составных частей трехфазной системы

**ТРЕБОВАНИЯ К ПЛОТНОСТИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И ОСНОВНЫЕ ПУТИ ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Земляное полотно в большинстве случаев возводится из местных грунтов и является основанием для дорожной одежды. В связи с этим для обеспечения высоких эксплуатационных качеств дорожной одежды земляное полотно должно быть прочным, долговечным и устойчивым независимо от изменения погодно-климатических условий на протяжении всего периода эксплуатации. Дорожную одежду и земляное полотно надо рассматривать в комплексе, как единое инженерное сооружение. Отсюда вытекает одно из важнейших требований проектирования и строительства земляного полотна — конструктивными и технологическими мерами свести к минимуму колебания влажности и температуры и тем самым обеспечить минимальное изменение прочности грунта в процессе эксплуатации дороги.

Основными мероприятиями, обеспечивающими прочность и устойчивость земляного полотна, являются:

- применение в пределах рабочего слоя грунтов, обладающих повышенной устойчивостью к воздействию погодно-климатических факторов;
- обеспечение требуемого уплотнения грунта;

- обеспечение требуемого возвышения земляного полотна над расчетным уровнем грунтовых вод;
- придание соответствующего очертания откосам насыпи (выемки) с учетом типа грунта;
- укрепление откосов насыпи (выемки) для предотвращения их водной и ветровой эрозии;
- ограничение увлажнения от различных источников путем устройства гидро- и теплоизоляционных прослоек, дренажей;
- укрепление и улучшение грунта рабочего слоя с использованием вяжущих, гранулометрических добавок и др.

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ НАСЫПИ**

Физические свойства грунтов имеют большое практическое значение и подразделяются на: общие физические, физико-механические, водные и тепловые.

К общим физическим свойствам относятся влажность, плотность, пористость и удельная поверхность грунта; к физико-механическим — прочность и деформируемость, пластичность, гибкость, усадка, набухание, связность.

К водным свойствам грунтов относятся водоудерживающая, водопропускная (водопроницаемость) и водоподъемная (капиллярная) способности; к тепловым — теплоемкость, теплопроводность и теплопоглощательная способность грунтов.

Для оценки физических свойств грунтов их характеристики подразделяют на два класса. Первый — прочность и деформируемость грунтов, определяемые на образцах с ненарушенной структурой, второй — показатели, характеризующие состав и состояние грунта, определяемые на образцах с нарушенной структурой.

Главными показателями второго класса являются состав (минералогический, петраграфический, химический и гранулометрический), состояние и консистенция глинистых грунтов. Состояние грунтов характеризуется влажностью, плотностью и пористостью.

**ПРОЧНОСТЬ ГРУНТА**

Как видно из общей характеристики физических свойств грунтов, важными являются показатели второго класса, т. е. состав и состояние, которые имеют большое практическое значение при оценке грунтов, как естественных оснований различных сооружений; а также при оценке устойчивости земляного полотна и уплотнения грунта. При этом следует иметь в виду, что грунт состоит из твердых минеральных частиц и расположенных между ними пустот — пор, которые могут быть заполнены воздухом (газом) или водой. Следовательно, твердые минеральные частицы, вода и воздух являются основными компонентами, составляющими грунт. Грунт представляет собой трехфазную систему. Учитывая изложенное, на основе элементарного представления о грунте в трехфазном состоянии (без учета структурных особенностей) можно написать выражение для единичного объема грунта согласно [3]



$$\frac{\rho_d}{\rho_s} + \frac{W_w \rho_d}{100} + \frac{V}{100} = 1 \quad (1)$$

где  $\rho_d$  — плотность сухого грунта, г/см<sup>3</sup>;  
 $W_w$  — весовая (массовая) влажность грунта, %;  
 $V$  — объем воздуха, %;  
 $\rho_s$  — плотность частиц грунта, г/см<sup>3</sup>;  
 $1$  — единичный объем грунта (1 см<sup>3</sup>).

Отсюда, учитывая, что плотность воды  $\rho_0 = 1$ , получим выражение

$$\rho_d = \frac{\rho_s \left(1 - \frac{V}{100}\right)}{1 + \frac{W_w \rho_s}{100}} \quad (2)$$

Для достижения максимальной плотности грунтов при небольших изменениях внешних давлений порядка 0,5–0,7 МПа можно рассматривать грунты как линейно-деформируемые тела, т. е. с достаточной для практических целей точностью можно принимать зависимость между общими деформациями и напряжениями для грунтов как линейную [4, 5].

Для дисперсных грунтов их деформацию во времени можно описать линейной теорией наследственной ползучести Больцмана-Вольтера, согласно которой связь между напряжениями и деформациями определяется выражением

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E} \left[ \sigma(t) + \int_0^t k(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau \right], \quad (3)$$

где  $\varepsilon(t)$  — относительная деформация;  
 $\sigma$  — напряжение;  
 $E$  — модуль упругости грунта;  
 $k(t-\tau)$  — ядро интегрального уравнения, которое в данном случае представляет функцию влияния напряжений  $\sigma(\tau)$  в момент времени  $\tau$  на деформацию в момент времени  $t$ ;  
 $t$  — время наблюдения;  
 $\tau$  — время, предшествующее моменту наблюдения.

При использовании уравнения (3) модуль упругости грунта  $E$  следует заменить на общий модуль деформации (упругой и остаточной)  $E_0$  [6].

В общем виде решение интегрального уравнения (3) относительно напряжения  $\sigma(\tau)$  следующее

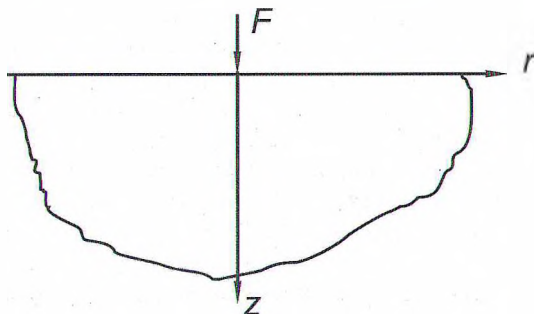


Рисунок 2. Квазигодородное вязкоупругое полупространство

$$\sigma(t) = E \left[ \varepsilon(t) + \int_0^t R(t-\tau) \varepsilon(\tau) d\tau \right], \quad (4)$$

где  $R(t-\tau)$  — резольвента интегрального уравнения (3) или ядро релаксации.

Вид ядра ползучести и резольвенты соответственно

$$k(t-\tau) = \delta e^{-\beta(t-\tau)}, \quad (5)$$

$$R(t-\tau) = \delta e^{-(\delta+\beta)(t-\tau)}. \quad (6)$$

где  $\delta, \beta$  — параметры, определяемые по опытным кривым ползучести.

Функции  $k(t-\tau)$  и  $R(t-\tau)$  должны быть положительными и монотонно убывающими.

Для решения уравнений (3) и (5) грунт земляного полотна профессором Макаревичем С.С. рассматривается как квазигодородное вязкоупругое полупространство (рисунок 2). Напряжения и перемещения в данном полупространстве от сосредоточенной силы  $F$  (рисунок 3) удобно искать в цилиндрической системе координат, через функцию напряжений  $\varphi = \varphi(r, z)$ , с которой напряжения и перемещения связаны зависимостями (7):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \nabla^2 \varphi - \frac{\partial \varphi^2}{\partial z^2} \right), \\ \sigma_\theta &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \nabla^2 \varphi - \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right), \\ \sigma_r &= \frac{\partial}{\partial z} \left[ (2-\mu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right], \\ \tau_{rz} &= \frac{\partial}{\partial z} \left[ (1-\mu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right], \\ U &= -\frac{1+\mu}{E_0} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial z} - \frac{1+\mu}{E_0} \int_0^t \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial z} (k(t-\tau) d\tau) \\ W &= \frac{1+\mu}{E_0} \left[ 2(1-\mu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right] + \\ &+ \frac{1+\mu}{E_0} \int_0^t \left[ 2(1-\mu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right] k(t-\tau) d\tau, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

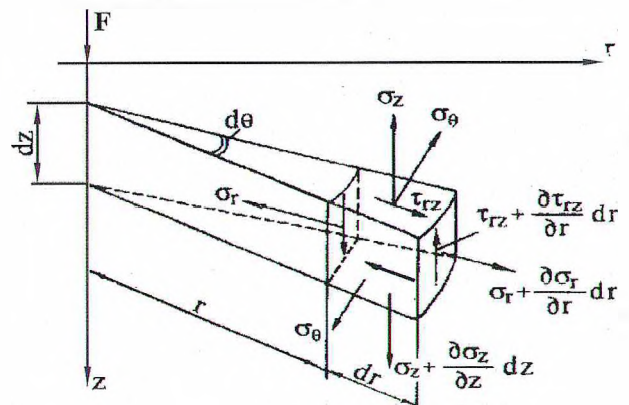


Рисунок 3. Схема напряжений в цилиндрической системе координат

где  $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta$  — нормальные напряжения, действующие соответственно по площадкам, перпендикулярным осям  $z$  и  $r$ , и касательной к окружности радиусом  $r$  (см. рисунок 3);

$E_0$  — общий модуль деформации грунта;  
 $\tau_{rz}$  — касательные напряжения в плоскости  $rz$ ;  
 $U$  — горизонтальное перемещение (по оси  $r$ );  
 $W$  — вертикальное перемещение (по оси  $z$ );  
 $\nabla^2$  — оператор Лапласа, который в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial r}. \quad (8)$$

В качестве функций напряжений принята функция, определяемая по формуле

$$\varphi = CR + B(Z \ln(R + Z) - R) \quad (9)$$

где  $R = \sqrt{r^2 + z^2}$  — функция, удовлетворяющая бигармоническому уравнению  $\nabla^2(\nabla^2\varphi) = 0$ .

Далее мы будем рассматривать напряжения и перемещения по оси  $z$ , поэтому, подставляя в уравнение (7) функцию напряжений  $\varphi$ , получим:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= 3C \frac{r^2 z}{R^5} - 2(2-\mu)C \frac{z}{R^3} + B \frac{z}{R^3} \\ \tau_{rz} &= 3C \frac{r^3}{R^5} - 2C \frac{r}{R^3} - 2C(1-\mu) \frac{r}{R^3} + B \frac{r}{R^3} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Для определения постоянных  $B$  и  $C$  используем граничные условия при  $z = 0, R = z, \tau_{rz} = 0$ . Тогда

$$\tau_{rz(z=0)} = \frac{1}{r^2} (3C - 2C + 2C\mu - 2C + B) = 0.$$

Откуда

$$B = C(1 - 2\mu). \quad (11)$$

Подставив выражение (11) в уравнение для  $\sigma_z$  из системы (10) получим

$$\sigma_z = -3C \frac{z^3}{R^5}. \quad (12)$$

Чтобы найти параметр  $C$  проведем сечение, параллельное поверхности грунта, т. е.  $z = const$ , и запишем условие равновесия отсеченной части

$$F + \int_A \sigma_z dA_1 = 0,$$

или

$$F + 2\pi \int_0^r \sigma_z r dr = 0, \quad (13)$$

где  $A_1$  — площадь сечения.

Подставляя в выражение (13) значение  $\sigma_z$ , согласно (12) найдем

$$F - 2\pi C = 0.$$

Откуда

$$C = \frac{F}{2\pi}. \quad (14)$$

Тогда согласно уравнению (11) получим

$$B = \frac{F}{2\pi} (1 - 2\mu). \quad (15)$$

Подставляя постоянные  $B$  и  $C$  в уравнение (10), получим:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= -\frac{3Fz^3}{2\pi R^5}, \\ \tau_{rz} &= -\frac{3Frz^2}{2\pi R^5}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Если в уравнение вертикального перемещения в системе (7) подставить значение функции и постоянные  $B$  и  $C$  получим

$$W = \frac{1+\mu}{2\pi E_0 R} \left[ \frac{z^2}{R^2} + 2(1-\mu) \right] \left[ F + \int_0^t Fk(t-\tau) d\tau \right]. \quad (17)$$

Если сила  $F$  не меняется во времени, то получим следующее выражение

$$W = \frac{F(1+\mu)}{2\pi E_0 R} \left[ \frac{z^2}{R^2} + 2(1-\mu) \right] \left[ 1 + \int_0^t k(t-\tau) d\tau \right]. \quad (18)$$

Приняв ядро ползучести (5) в виде экспоненты, которое при постоянной нагрузке будет иметь вид  $k(\tau) = \delta_0 e^{-\beta_0 \tau}$ , получим

$$W = \frac{F(1+\mu)}{2\pi E_0 R} \left[ \frac{z^2}{R^2} + 2(1-\mu) \right] \left[ 1 + \frac{\delta_0}{\beta_0} (1 - e^{-\beta_0 t}) \right]. \quad (19)$$

Постоянные  $\delta_0$  и  $\beta_0$  определяются из опытов на ползучесть.

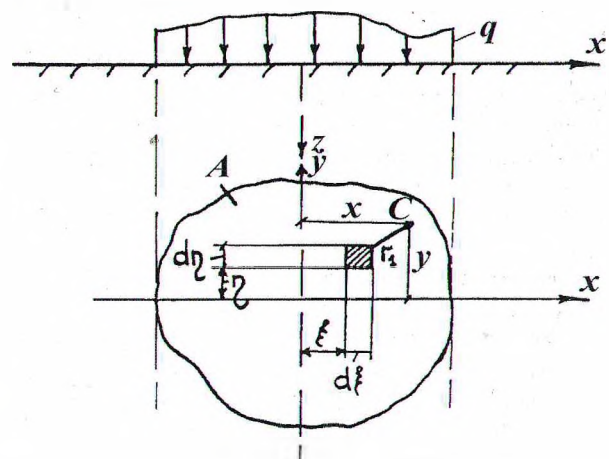


Рисунок 4. Расчетная схема определения перемещения поверхности полупространства от сплошной нагрузки  $q$



На поверхности грунта при  $z = 0$  и  $R = z$  вертикальные перемещения будут равны:

$$W = \frac{F(1-\mu^2)}{\pi E_0 r} \left[ 1 + \frac{\delta_0}{\beta_0} (1 - e^{-\beta_0 r}) \right] \quad (20)$$

Анализ формул (16) и (20) показывает, что перемещение (осадка) в точке приложения силы  $F$  становится бесконечно большим (ой), но, учитывая, что практически сила действует не в точке, а через какую-то площадку, решение данной задачи может быть получено на основании принципа суперпозиции. При уплотнении грунта земляного полотна давление на грунт передается через площадку, которую можно принять как плоскость, ограничивающую полупространство, т. е. действует сплошная нагрузка  $q$ , распределенная на некоторой площади  $A$  (рисунок 4).

На выделенную элементарную площадку  $dA = d\xi d\eta$  действует сила  $dF = qdA = qd\xi d\eta$ , которую будем считать сосредоточенной ( $q$  — сплошная распределенная нагрузка). Перемещение (осадку) поверхности полупространства  $dW$  от силы  $dF$  в точке  $C(x, y)$ , заменив  $r$  на

$$r_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}, \text{ можно определить по формуле}$$

$$dW = \frac{dF(1-\mu^2)}{\pi E_0 \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}} \left[ 1 + \frac{\delta_0}{\beta_0} (1 - e^{-\beta_0 r_1}) \right] \quad (21)$$

Чтобы получить перемещение точки  $C(x, y)$  от действия нагрузки  $q$  необходимо уравнение (21) проинтегрировать по площади  $A$ , тогда

$$W = \iint_A \frac{d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}} \times \frac{q(1-\mu^2)}{\pi E_0} \left[ 1 + \frac{\delta_0}{\beta_0} (1 - e^{-\beta_0 r_1}) \right] \quad (22)$$

Интеграл из формулы (22) можно обозначить  $J$

$$J = \iint_A \frac{d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}} \quad (23)$$

Этот интеграл зависит только от геометрической формы площади  $A$ , по которой распределена нагрузка. При уплотнении грунта земляного полотна можно принять, что нагрузка (давление) распределена по площади прямоугольника шириной  $b$  и длиной  $l$ . Тогда интеграл (23) можно выразить через элементарные функции и определить численным методом для различных значений отношения  $J/b$ . Результаты этих определений [6] приведены в таблице 1.

Подставляя различные значения отношения  $J/b$  из таблицы 1 в формулу (22), получим перемещения соответствующих

точек прямоугольной площадки загрузки, выраженные через ее ширину.

Так, при прямоугольной площадке загрузки в ее центре с отношением сторон  $l/b = 10$  получим

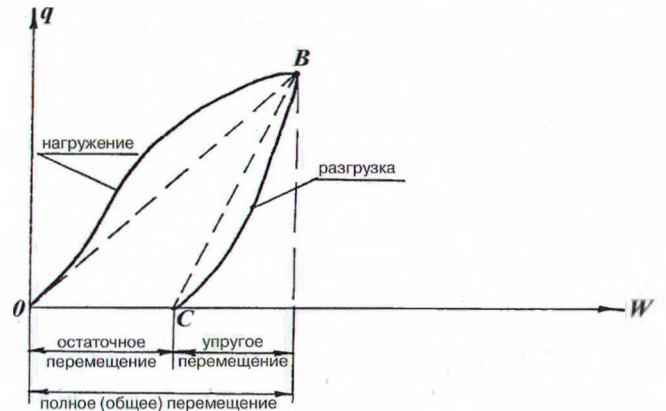


Рисунок 5. Зависимость между вертикальным перемещением и давлением на поверхности уплотняемого грунта

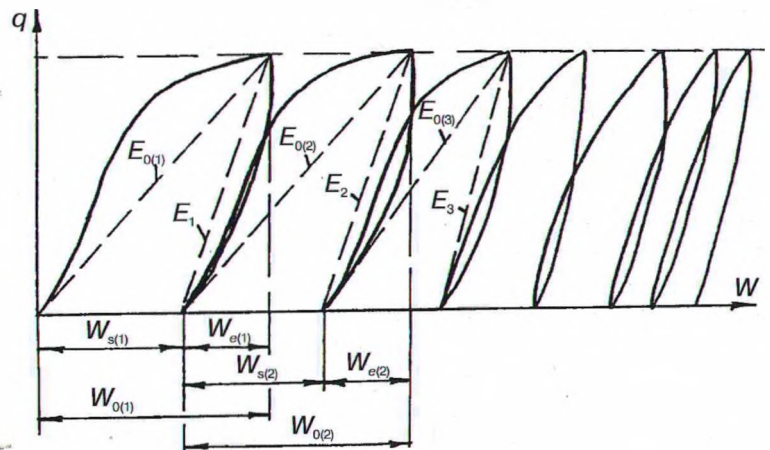


Рисунок 6. Характер накопления деформаций при циклически повторяющейся нагрузке-разгрузке

Таблица 1. Значения отношения  $J/b$  при определении вертикальных перемещений

Отношение сторон $l/b$	Значение отношения $J/b$			
	в угловых точках прямоугольника	в центре прямоугольника	среднее значение перемещения	при загрузении абсолютно жестким уплотнителем
1	1,759	3,518	2,984	2,765
2	2,403	4,806	4,084	3,833
3	2,796	5,592	4,806	4,524
4	3,079	6,158	5,341	5,058
5	3,298	6,596	5,749	5,403
10	3,974	7,948	7,068	6,660

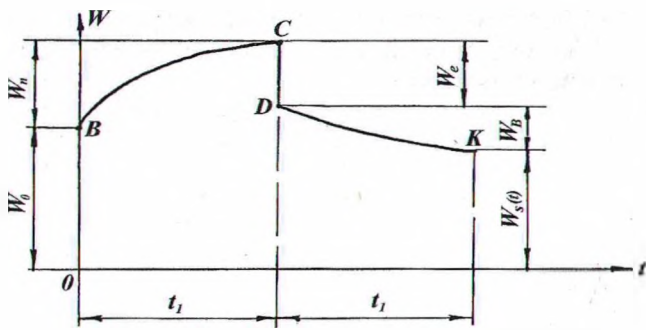


Рисунок 7. Кривые ползучести для определения постоянных  $\delta_0$  и  $\beta_0$  ( $\delta$  и  $\beta$ )

$$W = 7,948 \frac{qb(1-\mu^2)}{\pi E_0} \left[ 1 + \frac{\delta_0}{\beta_0} (1 + e^{-\beta_0 t}) \right] \quad (24)$$

Определяемые по формулам (22) и (24) перемещения являются полными и включают в себя как упругие, так и остаточные деформации. Характерная зависимость между вертикальным перемещением  $W$  и давлением на поверхности уплотняемого грунта  $q$  показана на рисунке 5. Кривую нагружения  $OB$  можно заменить прямой, которая описывается общим модулем деформации грунта  $E_0$ , а кривую разгрузки — прямой  $BC$ , которая будет характеризовать модуль упругости грунта  $E$ .

При уплотнении грунтов земляного полотна нагрузки по одному следу многократно повторяются, что ведет к накоплению деформаций в грунте [7]. При этом происходит постепенное уменьшение в пределах цикла как остаточных, так и упругих деформаций [8]. Это можно объяснить постепенным возрастающим уплотнением грунта. Остаточные деформации уменьшаются быстрее чем упругие, и при достаточно большом числе циклов нагрузки-разгрузки приобретают характер упругих (рисунок 6).

Суммарное остаточное вертикальное перемещение поверхности грунта при  $N$  циклах  $W_s^*(N)$  определяется по формуле

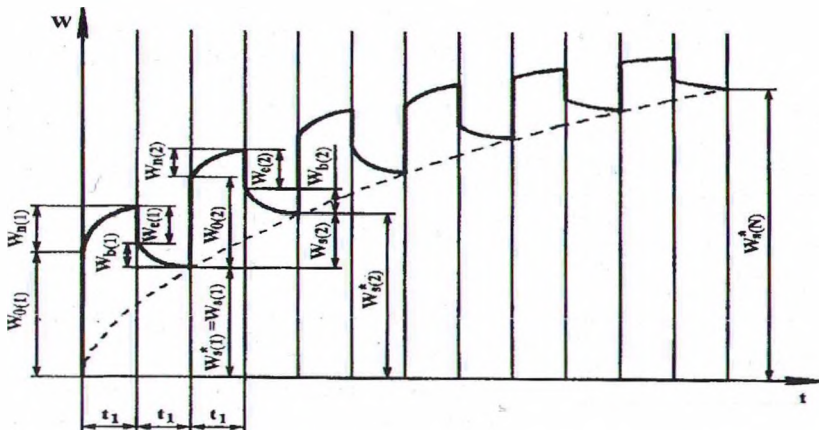


Рисунок 8. Накопление остаточных деформаций при  $N$  циклах нагрузки-разгрузки

$$W_s^*(N) = \frac{q(1-\mu^2)}{\pi} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{1}{E_{0(i)}} \left( 1 + \frac{\delta_{0(i)}}{\beta_{0(i)}} (1 - e^{-\beta_{0(i)} t}) \right) - \frac{1}{E_i} \left( 1 + \frac{\delta_i}{\beta_i} (1 - e^{-\beta_i t}) \right) \right] \quad (25)$$

где  $E_{0(i)}$  — общий модуль деформации грунта при  $i$ -ом цикле;  
 $E_i$  — модуль упругости грунта при  $i$ -ом цикле;  
 $\mu$  — коэффициент Пуассона;  
 $\delta_{0(i)}, \beta_{0(i)}$  — параметры, характеризующие общую деформацию ползучести при  $i$ -ом цикле;  
 $\delta_i, \beta_i$  — параметры, характеризующие вязкоупругую деформацию при  $i$ -ом цикле.

Для определения постоянных  $\delta_0$  и  $\beta_0$  необходимо при полевых испытаниях грунта построить кривую  $BC$  (рисунок 7), а для определения  $\delta$  и  $\beta$  — кривую  $DK$  при  $t = 0,5t_1$  и  $t = t_1$  (где  $t_1$  — время действия нагрузки при контакте с грунтом). Время  $t_1$  определяют по формуле

$$t_1 = \frac{l_k}{v} \quad (26)$$

где  $l_k$  — длина контакта катка с грунтом, м;  
 $v$  — скорость движения катка, м/с.

Характер накопления остаточных вертикальных перемещений при  $N$  циклах нагрузки-разгрузки показан на рисунке 8.

Зная суммарную величину остаточных вертикальных деформаций (перемещений) при  $N$  циклах нагрузки-разгрузки можно с учетом исследований [8] определить максимальную (требуемую) плотность грунта земляного полотна при уплотнении

$$\rho_{\max} = \rho \frac{1 - \frac{1}{W_w} (W_w - 0,11\sqrt{W_w}) \frac{W_s^*(N)}{h_{\max}}}{1 - \frac{W_s^*(N)}{H_0}} \quad (27)$$

где  $\rho$  — плотность грунта в исходном состоянии, г/см<sup>3</sup>;  
 $W_w$  — влажность грунта, %;  
 $H_0$  — толщина эквивалентного (уплотняемого) слоя грунта, определяемая по формуле

$$H_0 = \frac{1-\mu^2}{1-2\mu} wb, \quad (28)$$

здесь  $w$  — коэффициент, зависящий от формы и размеров площадки загрузки, определяемый по формуле

$$w = \frac{J}{b} \pi, \quad (29)$$



$\frac{J}{b}$  — отношение, определяемое по таблице 1.

Величина  $h_{max}$  определяется по формуле

$$h_{max} = H_0 \left( 1 - \frac{\rho}{(1 - W_w) \rho_s} \right) \quad (30)$$

где  $\rho_s$  — плотность частиц грунта, г/см<sup>3</sup>.

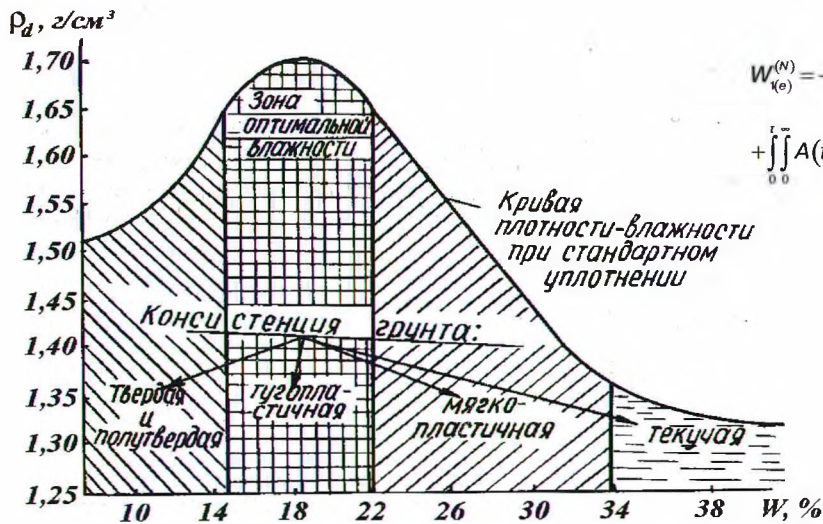


Рисунок 9. Изменение консистенции и плотности суглинистого грунта в зависимости от его влажности

Таблица 2. Данные лабораторных исследований

Наименование показателя грунта	Значение показателя для образцов	
	1-ого	2-ого
Плотность частиц грунта $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	2,68	2,68
Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,0	1,6
Весовая влажность грунта $W_w$ , %	18	22

Таблица 3

Наименование показателя грунта	Значение показателя для образцов	
	1-ого	2-ого
Пористость $n$ , %	$n = [1 - \rho / \rho_s (1 + 0,01 W_w)] 100 = 36,7$	51,0
Плотность сухого грунта $\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_d = \rho / (1 + 0,01 W_w) = 1,69$	1,31
Объемная влажность $W_{об}$ , %	$W_{об} = 100 W_w \rho_d = 30,4$	28,8
Степень влажности (относительная влажность) $S_r$ , доли ед.	$S_r = W_w \rho / (1 - n) = 0,82$	0,57

Толщину уплотняемого слоя можно найти, если определить деформацию слоя при нагружении (верхняя граница) и деформацию верхней границы грунта при разгрузке при  $N$ -ом цикле.

Деформация поверхности слоя при нагружении при  $N$ -ом цикле определяется по формуле

$$W_2^{(N)} = W_1^{(N)} = \frac{1 + \mu_1}{E_0^{(N)} h^2} \left[ (A(t) + 2B(t)(1 - \mu_1)) e^{-\alpha} I_0(\alpha \rho) d\alpha + \int_0^t \int_0^{\infty} (A(t) + 2B(t)(1 - \mu_1)) e^{-\alpha} I_0(\alpha \rho) \delta_1^{(N)} e^{-\beta \tau} d\alpha d\tau \right] \quad (31)$$

Деформация верхней границы при разгрузке при  $N$ -ом цикле определяется по формуле

$$W_{(e)}^{(N)} = -\frac{1 + \mu_1}{E_1^{(N)} h^2} \left[ \int_0^t (A(t) + 2B(t)(1 - \mu_1)) e^{-\alpha} I_0(\alpha \rho) + \int_0^t \int_0^{\infty} (A(t) + 2B(t)(1 - \mu_1)) e^{-\alpha} I_0(\alpha \rho) \delta_1^{(N)} e^{-\beta \tau} d\alpha d\tau \right] \quad (32)$$

где  $h$  — толщина слоя грунта;  
 $A(t), B(t)$  — коэффициенты, которые являются функциями, зависящими от нагрузки, характеристики грунтов слоя, параметра интегрирования  $\alpha$  и времени  $t$ ;  
 $\alpha$  — параметр интегрирования;  
 $I_0(\alpha \rho)$  — функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Остаточная деформация грунта на границе слоя при  $N$ -ом цикле будет определяться по формуле

$$W_{(s)}^{(N)} = W_1^{(N)} - W_{(e)}^{(N)} \quad (33)$$

Остаточная деформация нижней границы верхнего слоя при  $N$ -ом цикле вычисляется по формуле

$$W_{2(s)}^{(N)} = W_2^{(N)} - W_{2(e)}^{(N)} \quad (34)$$

Приравняв остаточную деформацию к толщине слоя грунта при  $N$ -ом цикле, определим толщину по формуле

$$W^{(N)} = W^{(N-1)} + W_{1(s)}^{(N)} - W_{2(s)}^{(N)} \quad (35)$$

Тогда общую толщину уплотняемого слоя грунта при  $K$  циклах можно записать в виде

$$W_{S(K)} = \sum_{N=1}^K W_{1(s)}^{(N)} - \sum_{N=1}^K (W_1^{(N)} - W_{1(e)}^{(N)}) \quad (36)$$

Разработанная математическая модель дает возможность исследовать процессы деформации и уплотнения грунта земляного полотна, что позволяет установить оптимальную толщину уплотняемого слоя

и уменьшить трудозатраты и сроки уплотнения грунта земляного полотна, а также определить максимально возможную плотность сухого грунта в зависимости от его влажности.

**ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА НА ЕГО ПРОЧНОСТЬ В ПРОЦЕССЕ УПЛОТНЕНИЯ**

Влажность грунта является важнейшей характеристикой его состояния (рисунок 9) и определяет его прочность и поведение под воздействием нагрузки. Сказанное подтверждают зависимости (2) и (27), которые показывают, что степень плотности грунта при одинаковой плотности его частиц будет тем выше, чем меньше объем воздуха (пор) и влажность грунта. Поэтому оценкой уплотнения грунта служит степень его плотности, при которой прекращается дальнейшая осадка земляного полотна при воздействии повторных нагрузок и увлажнения. При этом необходимо иметь ввиду, что в естественных условиях естественная влажность грунта не всегда соответствует его полной влагоемкости. Поэтому для характеристики физического состояния грунтов помимо их естественной влажности необходимо знать степень заполнения пор водой (относительную влажность).

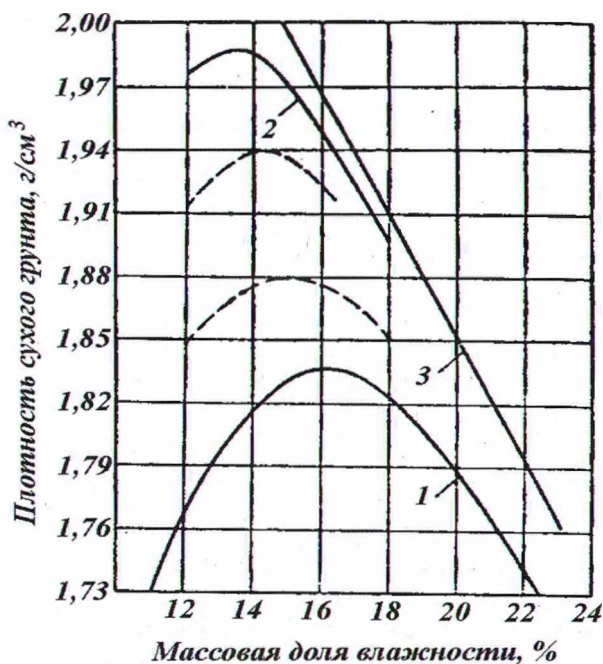
Например, при исследовании двух образцов грунта с различной влажностью были получены данные, приведенные в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что значение весовой влажности грунта  $W_w$  второго образца на 4 % больше значения первого. Однако это не говорит о том, что второй образец более водонасыщен чем первый. Для решения этого вопроса следует вычислить пористость, плотность и степень влажности грунта (таблица 3).

Из расчетов, представленных в таблице 3, видно, что объемная влажность  $W_{об}$  первого образца равна 30,4 %, пористость — 36,7 %, т. е. на 82 % поры грунта заполнены водой, поэтому и степень влажности (относительная влажность) первого образца составляет 0,82. Объемная влажность второго образца равна 28,8 %, т. е. поры грунта заполнены всего лишь на 56,5 %, так как пористость второго образца составляет 51 %, соответственно и степень влажности — 0,57. Это значит, что первый образец почти полностью заполнен водой, а второй — чуть более половины, хотя значение естественной влажности второго образца больше значения первого на 4 %. Таким образом, при уплотнении грунтов важно знать не только естественную, но и относительную влажность грунта.

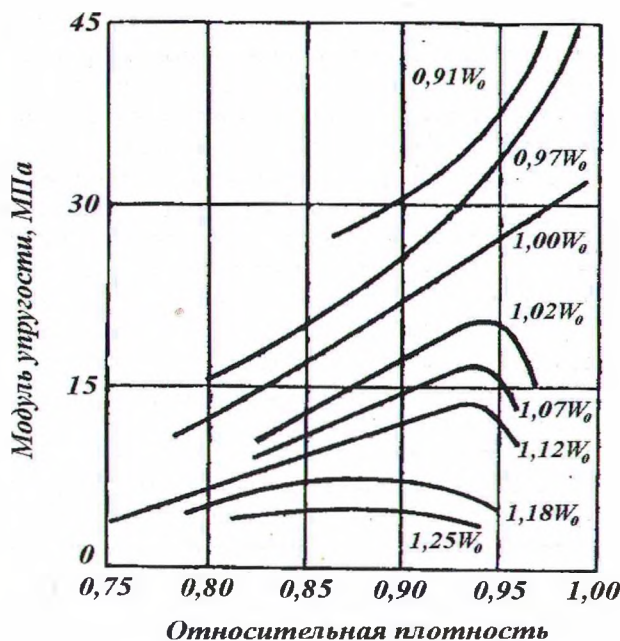
Как показывают исследования, для получения наиболее плотной структуры грунта необходимо, чтобы влажность грунта была такой, при которой его пористость, т. е. объем защемленного воздуха, составляла 4 %–6 %. [6] Это связано с образованием прочных гидратных оболочек, которые обеспечивают минимальное набухание и малую водопроницаемость грунта, а следовательно, и наибольшую прочность, характеризуемую модулем упругости. Если влажность грунта будет ниже, а объем защемленного воздуха (объем пор) больше 6 %, то получим неустойчивую структуру грунта, которая при увлажнении разбухает и тем больше, чем выше влажность; также при недостаточном уплотнении может давать осадку, а модуль упругости — понижается. При полном заполнении пор грунта водой, т. е. защемленный

то получим неустойчивую структуру грунта, которая при увлажнении разбухает и тем больше, чем выше влажность; также при недостаточном уплотнении может давать осадку, а модуль упругости — понижается. При полном заполнении пор грунта водой, т. е. защемленный



1 — стандартное уплотнение; 2 — усиленное уплотнение; 3 — линия нулевых пор

**Рисунок 10.** Изменение оптимальной плотности и оптимальной влажности при разном уплотнении



**Рисунок 11.** Изменение модуля упругости грунта при различных его относительной плотности и влажности



Таблица 4. Степень уплотнения грунта в слоях земляного полотна

Вид земляного полотна	Часть земляного полотна	Глубина расположения слоя от поверхности покрытия, м	Минимальный коэффициент уплотнения грунта при типах дорожных одежд	
			капитальном	облегченном и переходном
Насыпи	Верхняя (рабочий слой)	До 1,5	1,00-0,99	1,00-0,98
	Нижняя неподтопляемая	От 1,5 до 6,0 включ.	0,95	0,95
		Более 6,0	0,98	0,95
	Нижняя подтопляемая	От 1,5 до 6,0 включ.	0,98-0,95	0,95
Более 6,0		0,98	0,95	
Выемки и нулевые места	В слое сезонного промерзания	До 1,2	1,00-0,99	1,00-0,98
	Ниже слоя сезонного промерзания	До 1,2	0,95	0,95-0,92

*Примечание* — Большие значения коэффициентов уплотнения грунта следует принимать в случаях применения цементобетонных покрытий и оснований.

воздух удален, структура грунта также неустойчива и модуль упругости понижается. Из изложенного выше следует, что максимальную плотность можно получить при какой-то определенной влажности. Эту влажность принято называть оптимальной, значение которой для различных типов грунтов различно и колеблется в пределах от 8 %–10 % (пески мелкие и пылеватые) до 18 %–26 % (глины).

Оптимальная влажность грунта зависит от степени его уплотнения, т. е. от плотности грунта (рисунок 10). Чем плотнее грунт, тем прочнее его структура при условии, что влажность находится в пределах от 8 % до 22 %. Для достижения прочной структуры грунта проводится большая работа по его уплотнению с применением различных катков по массе и по принципу действия; по увеличению числа проходов по одному следу. При этом имеется определенный минимум работ по уплотнению, ниже которого структура грунта делается неустойчивой. На рисунке 11 показано, что при избыточной влажности грунта, превосходящей оптимальную  $W_0$ , модуль упругости начинает резко падать в связи с нарушением структуры. Поэтому в каждой точке земляного полотна плотность грунта должна соответствовать нормативным значениям.

#### ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ ТНПА К ПЛОТНОСТИ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

В ТНПА по проектированию автомобильных дорог [9, 10, 11] дана дорожная классификация грунтов, сформулированы требования к их уплотнению при проектировании и возведении земляного полотна. Эти требования учитывают разновидности грунтов, степень их увлажнения и некоторые особенности производства работ по возведению насыпей.

Требования к уплотнению грунтов земляного полотна нормируются по значению плотности сухого грунта  $\rho_d$ , которую выражают в долях от максимальной стандарт-

ной плотности  $\rho_{dmax}$ , соответствующей стандартному уплотнению, выполненному в лаборатории при оптимальной влажности грунта. Отношение  $\rho_d/\rho_{dmax}$  называют коэффициентом уплотнения [12].

Степень уплотнения грунта для различных слоев земляного полотна, принимаемую как коэффициент уплотнения грунта по [12], приведена в таблице 4 согласно [11].

Во всех случаях при назначении плотности земляного полотна необходимо учитывать:

- тип дорожной одежды;
- природные условия местности (климатические, грунтовые, гидрологические, гидрогеологические и др.);
- тип подвижного состава и передаваемые им нагрузки;
- расположение слоя уплотняемого грунта по высоте насыпи;
- продолжительность осадки насыпи (между сооружением земляного полотна и открытием движения по дороге).

#### ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ УПЛОТНЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СВОЙСТВ ГРУНТА

Уплотнение грунта является ответственной технологической операцией при строительстве дороги, цель которого состоит в создании требуемой структуры грунта, обеспечивающей прочность и устойчивость дороги в целом. Это достигается механическим воздействием на грунт и увеличением его прочности. Поэтому задачей проектирования является выбор методов уплотнения, типов уплотняющих машин, технологических режимов (скорости движения и числа воздействий уплотнителей, продолжительности уплотнения).

Уплотнение дисперсных многофазных грунтов, используемых при возведении земляного полотна, имеет ряд характерных особенностей. Уплотняемость и прочность таких грунтов зависят от их дисперсности, свойств фаз и особенностей воздействия между ними.

В связи с этим суть уплотнения заключается в увеличении количества связей в грунтах и их упрочнении.

Одним из основных параметров процесса уплотнения, который определяется его эффективностью, является плотность грунта и изменение ее в процессе уплотнения.

Эффективность уплотнения грунта зависит от величины уплотняющих нагрузок и времени их воздействия. Поэтому задача теории уплотнения — это установление связи между плотностью грунта, величиной уплотняющих нагрузок и временем их воздействия.

Характер изменения плотности в зависимости от времени воздействия нагрузки является затухающим процессом, в котором можно выделить эффективное время уплотнения и соответствующую этому времени плотность грунта, которую можно определить по формуле

$$\rho_t = \rho + \rho_{\max} \frac{k k_1}{E_0} P t - \rho k_1 t, \quad (37)$$

где  $\rho$  — плотность грунта;

$\rho_{\max}$  — максимальная плотность грунта, когда при увеличении нагрузки из него будет удален весь воздух;

$P$  — уплотняющая нагрузка;

$k$  — коэффициент, учитывающий схему напряженного состояния грунта при деформации;

$k_1$  — коэффициент, характеризующий уплотняемость грунта во времени;

$t$  — время воздействия уплотняющей нагрузки.

Эффективность уплотнения зависит от сопротивления грунта, которое может быть представлено в виде трех составляющих: структурного, вязкого и инерциального.

Процесс уплотнения материала с коагуляционно-кристаллизационным типом структуры развивается следующим образом. Под действием приложенной нагрузки в материале возникает волна напряженно-деформированного состояния, которая распространяется тем быстрее, чем больше плотность и модуль упругости материала. В материалах с контактным типом структуры возникающая волна вызывает упругое сжатие частиц и агрегатов. Дальнейшее увеличение напряжений приводит к необратимым сдвигам и смещениям частиц и агрегатов.

Сдвигам препятствуют связи сил трения и сцепления частиц грунта. Сдвиги возникают в том случае, когда напряжения от уплотняющей нагрузки превышают силы трения и сцепления.

Все вышеизложенное необходимо учитывать при выборе уплотняющих средств. В настоящее время для уплотнения грунта земляного полотна применяют три основных метода: статический, вибрационный и ударно-вибрационный.

Статический метод применяют при укатке различными типами катков; вибрационный — при уплотнении виброкатками и ударно-вибрационный — при уп-

лотнении грунта трамбовками и вибротрамбующими органами уплотнения.

Наибольшее распространение при уплотнении грунтов земляного полотна получили катки, так как они пригодны как для материалов с коагуляционно-кристаллизационной, так и с контактной структурой.

Площадь контакта катка с уплотняемым слоем и форма эпюры контактных давлений определяют толщину уплотняемого слоя, которую можно определить по формуле (35), а общую толщину — по формуле (36).

Число проходов катка влияет на скорость укатки и на качество уплотнения, а время воздействия уплотняющей нагрузки оказывает большее влияние вначале уплотнения, чем в конце его.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании приведенных аналитических зависимостей и опыта возведения земляного полотна автомобильных дорог общего пользования можно сделать следующие выводы:

- 1 Уплотнение грунта земляного полотна является важнейшим условием обеспечения его прочности и устойчивости. Недоуплотнение его или неравномерное уплотнение, как правило, приводит к длительной консолидации, а в процессе эксплуатации — сопровождается возникновением просадок, сдвигов и других деформаций.
- 2 Как трехфазная система грунт при его уплотнении ведет себя по-разному в зависимости от физических свойств каждой фазы и их соотношения. Отсюда, в первую очередь, вытекают требования к подбору гранулометрического состава грунта и установлению его оптимальной влажности.
- 3 Уплотнение грунта может рассматриваться как его деформация под воздействием внешних нагрузок, создаваемых грунтоуплотнительной техникой. В статье приведены закономерности уплотнения грунта, как упруго-вязкой среды. Определена оптимальная влажность, которая позволяет достигнуть максимальной плотности грунта в каждом конкретном случае производства дорожно-строительных работ. Толщина уплотняемого слоя должна назначаться в зависимости от физико-механических свойств грунта и весовых параметров машин, используемых для уплотнения.
- 4 При выборе машин для уплотнения земляного полотна следует руководствоваться правилом: от легких катков с широкой опорной поверхностью — к тяжелым и от статического нагружения грунтовой массы — к виброн нагружению или ударному воздействию. Именно при таком подходе дорожные организации Беларуси смогут достичь высокой плотности грунтов земляного полотна, а это — необходимое условие прочности и устойчивости земляного полотна.



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Бабков, В.Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов / В.Ф. Бабков, В.М. Безрук. — М.: Высшая школа, 1986. — 416 с.
- 2 Вырко, Н.П. Исследование напряженно-деформированного состояния многослойного вязко-упругого полупространства с учетом воздействия подвижной нагрузки. Сб. науч. тр. / Бел. гос. техн. ун-т. Сер. I. / Н.П. Вырко. — Минск: Лесное хозяйство, 1998. — Вып. VI. — С. 204–210.
- 3 Вырко, Н.П. Дорожное грунтоведение с основами механики грунтов / Н.П. Вырко, И.И. Леонович. — Минск: Высшая школа, 1977. — 223 с.
- 4 Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов. — М.: Высшая школа, 1978. — 447 с.
- 5 Котиков, В.М. Воздействие лесозаготовительных машин на лесные почвы: автореф. дисс. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. / В.М. Котиков. — М., 1995.
- 6 Устройство земляного полотна автомобильных дорог: П2-02 к СНиП 3.06.03-85.
- 7 Иванов, Н.Н. Строительство автомобильных дорог: учебник для вузов, т. 1 / Н.Н. Иванов [и др.]; под ред. В.К. Некрасова — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1980. — 416 с.
- 8 Грунты. Классификация: СТБ 943-93. — Минск: Мин. архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 1995. — 18 с.
- 9 Хархута, Н.Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Н.Я. Хархута, Ю.М. Васильев. — М.: Транспорт, 1975. — 28 с.
- 10 Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. — М.: Высшая школа, 1973. — 280 с.
- 11 Автомобильные дороги. Нормы проектирования: ТКП 45-3.03-19-2006.
- 12 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности: ГОСТ 22733-2002.

**Статья поступила в редакцию 04.11.06.**