

2. Пример расчета в программе IndogPavement 9 конструкции дорожной одежды проезда (например: автопарковка, дорога в малоэтажной застройке) с покрытием из камней мощения толщиной (высотой) 80 мм

Расчёт конструкции дорожной одежды

Исходные данные

Название объекта: Проезды
 Выполняемые расчёты: На упругий прогиб, сдвиг, изгиб, стат. нагрузку, морозоустойчивость
 Дорожно-климатическая зона: П - подзона 1
 Схема увлажнения: Схема 1

Расчётная влажность грунта
 Среднее многолетнее значение относительной влажности грунта $W_{таб} = 0,65$
 Коэффициент нормированного отклонения $t = 1,32$ [1, табл. П.4.2]
 Тип местности по рельефу: Равнинный
 Поправка на особенности рельефа территории $\Delta_1 W = 0$ [1, табл. П.2.2]
 Поправка на конструктивные особенности проезжей части и обочин $\Delta_2 W = 0$ [1, табл. П.2.3]
 Поправка на влияние суммарной толщины стабильных слоёв дорожной одежды $\Delta_3 = 0$ [1, номогр. П.2.1]
 $W_p = (W_{таб} + \Delta_1 W - \Delta_2 W) \times (1 + 0,1 \times t) - \Delta_3 = (0,65 + 0 - 0) \times (1 + 0,1 \times 1,32) - 0 = 0,74$
 [1, формула П.2.1]

Коэффициент уплотнения грунта: 1,00
 Глубина промерзания грунтов, м: 1,93
 Средняя многолетняя глубина промерзания, м: 1,40

Проектные данные

Техническая категория дороги: IV категория
 Тип дорожной одежды: Капитальный

Требуемые коэффициенты прочности при заданной надёжности $K_n = 0,9$ [1, табл. 3.1]:
 Требуемый $K_{пр}$ (упругий прогиб): 1,1
 Требуемый $K_{пр}$ (сдвиг, изгиб): 0,94
 Коэффициент нормированного отклонения $t = 1,32$

Расчётный срок службы $T_{сл}$, лет: 10
 Ширина проезжей части, м: 7,5

Расчётная нагрузка

Давление в шине p , МПа: 0,60
 Диаметр отпечатка шины $D_{дн.}$, см: 26,00
 Статическая нагрузка на ось Q , кН: 50,00

Суммарное число приложений нагрузки

$\sum N_p = 15700$ ед.
 Требуемый модуль упругости

$$E_{тр} = 98,65 \times (\lg \sum N_p - c) = 98,65 \times (\lg 15700 - 3,55) \approx 63,72 \text{ МПа}$$

Проезды (8см)

- 1) **Конструктивный слой №1: 8,0 см**
 Камень мощения, $E = 1620,0$ МПа
- 2) **Конструктивный слой № 2: 5,0 см**
 Подстилайный слой из песка крупного, $E = 120,0$ МПа
- 3) **Конструктивный слой № 3: 23,0 см**
 Щебень фракционированный 20..40 мм легкоуплотняемый с заклиной фракционированным мелким щебнем фр.5..10, $E = 270,0$ МПа
- 4) **Конструктивный слой № 4: 20,0 см**
 Песок средней крупности, с содержанием пылевато-глинистой фракции 0%
 $E = 120,0$ МПа, $\phi = 29,87^\circ$, $\phi_{стат.} = 32,00^\circ$, $c = 0,00300$ МПа
 Геотекстиль (прочность на статическое продавливание не менее 1кН)
Грунт земляного полотна
 Грунт насыпной, уплотнённый
 $E = 45,6$ МПа, $\phi = 25,94^\circ$, $\phi_{стат.} = 31,00^\circ$, $c = 0,00400$ МПа

Расчёт на упругий прогиб

Расчёт по допускаемому упругому прогибу ведём послойно, начиная с грунта.
 [1, номогр. 3.1]

$$\frac{E_n}{E_b} = \frac{E_r}{E_4} = \frac{45,6}{120} = 0,38; \quad \frac{h_b}{D} = \frac{h_4}{D} = \frac{20}{26} = 0,77; \quad \frac{E_{пов}}{E_b} = \frac{E_{пов}^3}{E_4} \approx 0,6312$$

$$E_{пов}^3 = 0,6312 \times 120 = 75,74 \text{ МПа}$$

[1, номогр. 3.1]

$$\frac{E_n}{E_b} = \frac{E_4}{E_3} = \frac{75,74}{270} = 0,28; \quad \frac{h_b}{D} = \frac{h_3}{D} = \frac{23}{26} = 0,88; \quad \frac{E_{пов}}{E_b} = \frac{E_{пов}^2}{E_3} \approx 0,5658$$

$$E_{пов}^2 = 0,5658 \times 270 = 152,77 \text{ МПа}$$

[1, номогр. 3.1]

$$\frac{E_n}{E_b} = \frac{E_3}{E_2} = \frac{152,77}{120} = 1,27; \quad \frac{h_b}{D} = \frac{h_2}{D} = \frac{5}{26} = 0,19; \quad \frac{E_{пов}}{E_b} = \frac{E_{пов}^1}{E_2} \approx 0,9$$

$$E_{пов}^1 = 0,9 \times 120 = 108 \text{ МПа}$$

[1, номогр. 3.1]

$$\frac{E_n}{E_b} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{108}{1620} = 0,07; \quad \frac{h_b}{D} = \frac{h_1}{D} = \frac{8}{26} = 0,31; \quad \frac{E_{пов}}{E_b} = \frac{E_{пов}^0}{E_1} \approx 0,1193$$

$$E_{пов}^0 = 0,1193 \times 1620 = 193,27 \text{ МПа}$$

Расчёт понижающего коэффициента согласно ОДМ 218.5-003-2010

Общий модуль упругости на поверхности грунтовых слоёв $E_0 = 45,6$ МПа

$$E_{ср.} = \frac{\sum_{i=1}^4 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^4 h_i} = \frac{1620 \times 8 + 120 \times 5 + 270 \times 23 + 120 \times 20}{8 + 5 + 23 + 20} = 395,89 \text{ МПа}$$

$$\frac{E_{ср.}}{E_0} = \frac{395,9}{45,6} = 8,68 \quad \frac{h}{d} = \frac{20}{26} = 0,77$$

$$\alpha = 0,97$$

$$E_{\text{пов}} = E_{\text{пов}}^0 \times \alpha^{-1} = 193,27 \times 0,97^{-1} = 199,24$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{E_{\text{пов}}}{E_{\text{тр}}} = \frac{199,24}{63,72} = 3,13; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{3,13 - 1,1}{1,1} \times 100\% = 184,55\%$$

Расчёт на сдвигустойчивость

Конструктивный слой № 4

Материал: Песок средней крупности, с содержанием пылевато-глинистой фракции 0%

$E = 120,0$ МПа, $\phi = 29,87^\circ$, $\phi_{\text{стат.}} = 32,00^\circ$, $c = 0,00300$ МПа

Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 3.12]:

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^3 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^3 h_i} = \frac{1620 \times 8 + 120 \times 5 + 270 \times 23}{8 + 5 + 23} = 549,2 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки [1, номогр. 3.2, 3.3]:

$$\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{общ}}} = \frac{549,2}{75,7} = 7,25; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{36}{26} = 1,38; \quad \tau_{\text{н}} \approx 0,0199 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 3.13]

$$T = \tau_{\text{н}} \times p = 0,0199 \times 0,6 = 0,0119 \text{ МПа}$$

Коэффициент $k_d = 3$

Глубина расположения поверхности проверяемого слоя от верха конструкции

$$z_{\text{он}} = 8 + 5 + 23 = 36 \text{ см}$$

Средневзвешенный удельный вес слоёв, расположенных выше проверяемого

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{1500 \times 8 + 1500 \times 5 + 1600 \times 23}{8 + 5 + 23} = 1564 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 0,0016 \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 3.14]

$$T_{\text{пр}} = k_d \times c_n + 0,1 \times \gamma_{\text{ср}} \times z_{\text{он}} \times \text{tg}\phi_{\text{стат.}} = 3 \times 0,003 + 0,1 \times 0,0016 \times 36 \times \text{tg}32^\circ \approx 0,0125 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,0125}{0,0119} = 1,05; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1,05 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 11,7\%$$

Грунт земляного полотна

Материал: Грунт насыпной, уплотнённый

$E = 45,6$ МПа, $\phi = 25,94^\circ$, $\phi_{\text{стат.}} = 31,00^\circ$, $c = 0,00400$ МПа

Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 3.12]:

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^4 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^4 h_i} = \frac{1620 \times 8 + 120 \times 5 + 270 \times 23 + 120 \times 20}{8 + 5 + 23 + 20} = 395,9 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки [1, номогр. 3.2, 3.3]:

$$\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{общ}}} = \frac{395,9}{45,6} = 8,68; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{56}{26} = 2,15; \quad \tau_{\text{н}} \approx 0,0093 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 3.13]

$$T = \tau_{\text{н}} \times p = 0,0093 \times 0,6 = 0,0056 \text{ МПа}$$

Коэффициент $k_d = 3$

Глубина расположения поверхности проверяемого слоя от верха конструкции

$$z_{\text{он}} = 8 + 5 + 23 + 20 = 56 \text{ см}$$

Средневзвешенный удельный вес слоёв, расположенных выше проверяемого

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{1500 \times 8 + 1500 \times 5 + 1600 \times 23 + 1950 \times 20}{8 + 5 + 23 + 20} = 1702 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 0,0017 \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 3.14]

$$T_{\text{пр}} = k_d \times c_n + 0,1 \times \gamma_{\text{ср}} \times z_{\text{он}} \times \text{tg}\phi_{\text{стат.}} = 3 \times 0,004 + 0,1 \times 0,0017 \times 56 \times \text{tg}31^\circ \approx 0,0177 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,0177}{0,0056} = 3,19; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{3,19 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 239,4\%$$

Расчёт на статическую нагрузку

Конструктивный слой № 4

Материал: Песок средней крупности, с содержанием пылевато-глинистой фракции 0%

$E = 120,0$ МПа, $\phi = 29,87^\circ$, $\phi_{\text{стат.}} = 32,00^\circ$, $c = 0,00300$ МПа

Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 3.12]:

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^3 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^3 h_i} = \frac{1620 \times 8 + 120 \times 5 + 270 \times 23}{8 + 5 + 23} = 549,2 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки [1, номогр. 3.2, 3.3]:

$$\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{общ}}} = \frac{549,2}{75,7} = 7,25; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{36}{23} = 1,57; \quad \tau_{\text{н}} \approx 0,0137 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 3.13]

$$T = \tau_{\text{н}} \times p = 0,0137 \times 0,6 = 0,0082 \text{ МПа}$$

Коэффициент $k_d = 3$

Глубина расположения поверхности проверяемого слоя от верха конструкции

$$z_{\text{он}} = 8 + 5 + 23 = 36 \text{ см}$$

Средневзвешенный удельный вес слоёв, расположенных выше проверяемого

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{1500 \times 8 + 1500 \times 5 + 1600 \times 23}{8 + 5 + 23} = 1564 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 0,0016 \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 3.14]

$$T_{\text{пр}} = k_d \times c_n + 0,1 \times \gamma_{\text{ср}} \times z_{\text{он}} \times \text{tg}\phi_{\text{стат.}} = 3 \times 0,004 + 0,1 \times 0,0016 \times 36 \times \text{tg}32^\circ \approx 0,0155 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,0155}{0,0082} = 1,89; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1,89 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 101,1\%$$

Грунт земляного полотна

Материал: Грунт насыпной, уплотнённый

$E = 45,6$ МПа, $\phi = 25,94^\circ$, $\phi_{\text{стат.}} = 31,00^\circ$, $c = 0,00400$ МПа

Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 3.12]:

$$E_v = \frac{\sum_{i=1}^4 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^4 h_i} = \frac{1620 \times 8 + 120 \times 5 + 270 \times 23 + 120 \times 20}{8 + 5 + 23 + 20} = 395,9 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки [1, номогр. 3.2, 3.3]:

$$\frac{E_v}{E_{\text{общ}}} = \frac{395,9}{45,6} = 8,68; \quad \frac{h_v}{D} = \frac{56}{23} = 2,43; \quad \tau_n \approx 0,0067 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 3.13]

$$T = \tau_n \times p = 0,0067 \times 0,6 = 0,004 \text{ МПа}$$

Коэффициент $k_d = 3$

Глубина расположения поверхности проверяемого слоя от верха конструкции

$$z_{\text{оп}} = 8 + 5 + 23 + 20 = 56 \text{ см}$$

Средневзвешенный удельный вес слоёв, расположенных выше проверяемого

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{1500 \times 8 + 1500 \times 5 + 1600 \times 23 + 1950 \times 20}{8 + 5 + 23 + 20} = 1702 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 0,0017 \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 3.14]

$$T_{\text{пр}} = k_d \times c_n + 0,1 \times \gamma_{\text{ср}} \times z_{\text{оп}} \times tg\phi_{\text{стат.}} = 3 \times 0,005 + 0,1 \times 0,0017 \times 56 \times tg31^\circ \approx 0,0207 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,0207}{0,004} = 5,16; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{5,16 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 448,9\%$$

Расчёт на изгиб

Расчёт не может быть произведён, так как в конструкции верхний слой не является монолитным.

Результаты расчёта на морозоустойчивость

Материал грунта: Грунт насыпной, уплотнённый

Группа грунта по степени пучинистости 2

Высота насыпи 2 м, уровень грунтовых вод 2 м, толщина конструкции 0,56 м

Глубина грунтовых вод (от низа дорожной одежды) $H_y = 2 \text{ м} + 2 \text{ м} - 0,56 \text{ м} = 3,44 \text{ м}$

Величина морозного пучения при усреднённых условиях и глубине промерзания 1,93 м [1, номогр. 4.3]

$l_{\text{пуч.ср.2}} = 3,96 \text{ см}$

Коэффициент, учитывающий влияние расчётной глубины залегания уровня грунтовых или длительно стоящих поверхностных вод [1, номогр. 4.1]

$K_{\text{угв}} = 0,4428$

Коэффициент, зависящий от степени уплотнения грунта рабочего слоя [1, табл. 4.4]

$K_{\text{пл}} = 1$

Коэффициент, учитывающий влияние гранулометрического состава грунта [1, табл. 4.5]

$K_{\text{гр}} = 1$

Коэффициент, учитывающий влияние нагрузки от собственного веса вышележащей конструкции на грунт в промерзающем слое [1, номогр. 4.2]

$K_{\text{нагр}} = 0,86$

Коэффициент, зависящий от расчётной влажности грунта [1, табл. 4.6]

$K_{\text{вл}} = 1,14$

Величина возможного морозного пучения [1, формула 4.2]

$$l_{\text{пуч}} = l_{\text{пуч.ср.}} \times K_{\text{угв}} \times K_{\text{пл}} \times K_{\text{гр}} \times K_{\text{нагр}} \times K_{\text{вл}} = 3,96 \times 0,4428 \times 1 \times 1 \times 0,86 \times 1,14 = 1,72 \text{ см}$$

$$l_{\text{доп.}} = 4 \text{ см [1, табл. 4.3]}$$

Ожидаемая пучинистость грунта 1,72 см < 80% от допустимой 4,00 см
Морозоустойчивость конструкции обеспечена.

Название объекта	Проезды		
Район проектирования			
Выполняемые расчёты	На упругий прогиб, сдвиг, изгиб, стат. нагрузку, морозоустойчивость		
Техническая категория дороги	IV категория	Дорожно-климатическая зона	II - подзона 1
Тип дорожной одежды	Капитальный	Схема увлажнения	Схема 1
Число полос движения (в обе стороны)	2	Коэффициент уплотнения грунта	1,00
Номер расчётной полосы от обочины	1	Суммарное число приложенных нагрузки	15700
Уклоны в местах перелома профиля, %	—	Расчётное количество дней в году Трад	140
Расчётная влажность грунта Wp	0,74	Расчётный срок службы Тсл, лет	10
Нагрузка, кН / Давление, МПа / D штампа, см	50 / 0,60 / 26		
Заданная надёжность Kn	0,90	Глубина промерзания грунтов, м	1,93

№ варианта	Наименование слоя и материалов конструкции дорожной одежды	Схема конструкции дорожной одежды. Толщина, см	Расчётные характеристики				Общий модуль упругости на прочность слоев, МПа	Морозоустойчивость
			Упругий прогиб, МПа	Сдвиг, МПа	Изгиб, МПа	Статическая нагрузка, МПа		
Проезды (вкл)	1. Конструктивный слой №1 — Камень мощения		Еупр = 1620	Есдв = 1620	Еизг = 1620	Естат = 1620	Елов = 199 Ктр = 1,100 Красч = 3,130 Запас = 185%	
	2. Конструктивный слой №2 — Подстилающий слой из песка крупного		Еупр = 120	Есдв = 120	Еизг = 120	Естат = 120	Елов = 108	
	3. Конструктивный слой №3 — Щебень фракционированный 20, 40 мм легкоуплотнемый с заглинкой фракционированная мелкая щебенка фр. 5, 10		Еупр = 270	Есдв = 270	Еизг = 270	Естат = 270	Елов = 153	
	4. Конструктивный слой №4 — Песок средней крупности, с содержанием пылеватой-глинистой фракции 0%		Еупр = 120	Есдв = 120 Ктр = 0,940 Красч = 1,050 Запас = 12%	Еизг = 120 $\alpha = 0,970$	Естат = 120 Ктр = 0,940 Красч = 1,890 Запас = 101%	Елов = 76	
	— Геометрическая прочность на статическое продавливание не менее 140!							
	Грунт земляного полотна — Грунт насыпной, уплотнённый		Еупр = 46	Есдв = 46 Ктр = 0,940 Красч = 3,190 Запас = 233%	Еизг = 46 Ктр = 0,940 Красч = 5,160 Запас = 449%	Естат = 46 Ктр = 0,940 Красч = 5,160 Запас = 449%	Елов = 46	Лдоп = 4 см Луцн = 2 см Запас = 2 см