

Расчёт конструкции дорожной одежды

Исходные данные

Название объекта: Строительство внутрипоселковых автодорог (улиц Шалкар, Сункаркия, Алманов)
 в с. Иргиз Иргизского района Актюбинской области
 Район проектирования: село Иргиз
 Выполняемые расчёты: На упругий прогиб, сдвиг, изгиб, стат. нагрузку
 Дорожно-климатическая зона: IV
 Схема увлажнения: Схема 1

Расчётная влажность грунта

Среднее многолетнее значение относительной влажности грунта $W_{\text{таб}} = 0,65$
 Коэффициент нормированного отклонения $t = 1,32$ [1, табл. В.2]
 Поправка на конструктивные особенности проезжей части и обочин $\Delta_2 W = 0,03$ [1, табл. В.4]
 Расчётная влажность грунта [1, формула В.1] $W_p = (W_{\text{таб}} - \Delta_2 W) \times (1 + 0,1 \times t) = (0,65 - 0,03) \times (1 + 0,1 \times 1,32) = 0,7$

Коэффициент уплотнения грунта: 0,97
 Высота насыпи: 0,00 м
 Продольный уклон i , ‰: 40,00

Проектные данные

Техническая категория дороги: IV категория
 Тип дорожной одежды: Капитальный

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

Расчётный срок службы $T_{\text{сл}}$, лет: 14
 Ширина проезжей части, м: 6,0
 Число полос движения (в обе стороны): 2
 Номер расчётной полосы от обочины: 1

Расчётная нагрузка

Группа расчётной нагрузки A10 [1, табл. А.1]:
 Давление в шине p , МПа: 0,6
 Диаметр отпечатка шины $D_{\text{дин.}}$, см: 37,00
 Статическая нагрузка на ось $Q_{\text{ст}}$, кН: 100,00
 Статическая нагрузка от колеса на поверхность Q_n , кН: 50,00

Суммарное число приложений нагрузки

Показатель изменения интенсивности по годам q : 1,04

$$N_p = f_{\text{пол}} \times \sum_{m=1}^n N_m \times S_{\text{м сум}} = 0,55 \times (1000) \approx 550 \text{ ед./сут.}$$

$$\sum N_p = n_p \times N_p \times \frac{q^{T_{\text{сл}}} - 1}{q - 1} = 365 \times 550,00 \times \frac{1,040^{14} - 1}{1,040 - 1} \approx 3671717,50 \text{ ед.}$$

Требуемый модуль упругости [1, формула 8]:

$$E_{\text{тр}} = 120 + 74 \times (\lg \sum N_p - c) = 120 + 74 \times (\lg 3671717,5 - 4,5) = 272,8 \text{ МПа}$$

Суммарное число приложений расчётной нагрузки на межремонтный срок
 Срок службы между ремонтами $T_{\text{р.сл}} = 5$

Вариант № 1

1) Верхний слой покрытия: 5,0 см

Асфальтобетон горячей укладки плотный, из щебёночной (гравийной) смеси типа Б, марка битума БНД/БН-70/100 (СП РК 3.03-104-2014)

2) Нижний слой покрытия: 9,0 см

Асфальтобетон горячей укладки пористый из крупнозернистой щебёночной (гравийной) смеси марка битума БНД-70/100 (СП РК 3.03-104-2014)

3) Верхний слой основания: 15,0 см

Смеси щебёночные с непрерывной гранулометрией С4 - 80 мм (для оснований)

4) Нижний слой основания: 20,0 см

Подобранная песчано-гравийная смесь № С4 (ГОСТ 25607)

Грунт земляного полотна

Песок средней крупности с содержанием пылевато-глинистой фракции 0%

Расчёт на упругий прогиб

Расчёт по допускаемому упругому прогибу ведём послойно, начиная с грунта.

$$\begin{aligned}
 h_3 &= 2 \times h_3 \times \sqrt[3]{\frac{E}{6 \times E_{\text{пов}}}} = 2 \times 20 \times \sqrt[3]{\frac{180}{6 \times 120}} = 25,2 \text{ см} \\
 E^3_{\text{пов}} &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{h_3}{D} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_3}}\right)\right) \times E_3}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_3}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times h_3}{D}\right) + \frac{E_3}{E_{\text{пов}}} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{D}{h_3}} = \\
 &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{20}{37} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{120}{180}}\right)\right) \times 180}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{120}{180}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times 25,2}{37}\right) + \frac{180}{120} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{37}{25,2}} = 135,07 \text{ МПа} \\
 h_3 &= 2 \times h_2 \times \sqrt[3]{\frac{E}{6 \times E_{\text{пов}}}} = 2 \times 15 \times \sqrt[3]{\frac{275}{6 \times 135,07}} = 20,92 \text{ см} \\
 E^2_{\text{пов}} &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{h_2}{D} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_2}}\right)\right) \times E_2}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_2}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times h_2}{D}\right) + \frac{E_2}{E_{\text{пов}}} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{D}{h_2}} = \\
 &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{15}{37} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{135,07}{275}}\right)\right) \times 275}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{135,07}{275}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times 20,92}{37}\right) + \frac{275}{135,07} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{37}{20,92}} = 165,15 \text{ МПа} \\
 h_3 &= 2 \times h_1 \times \sqrt[3]{\frac{E}{6 \times E_{\text{пов}}}} = 2 \times 9 \times \sqrt[3]{\frac{2000}{6 \times 165,15}} = 22,75 \text{ см} \\
 E^1_{\text{пов}} &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{h_1}{D} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_1}}\right)\right) \times E_1}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_1}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times h_1}{D}\right) + \frac{E_1}{E_{\text{пов}}} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{D}{h_1}} = \\
 &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{9}{37} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{165,15}{2000}}\right)\right) \times 2000}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{165,15}{2000}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times 22,75}{37}\right) + \frac{2000}{165,15} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{37}{22,75}} = 256,68 \text{ МПа} \\
 h_3 &= 2 \times h_0 \times \sqrt[3]{\frac{E}{6 \times E_{\text{пов}}}} = 2 \times 5 \times \sqrt[3]{\frac{3200}{6 \times 256,68}} = 12,76 \text{ см} \\
 E^0_{\text{пов}} &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{h_0}{D} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_0}}\right)\right) \times E_0}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_0}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times h_0}{D}\right) + \frac{E_0}{E_{\text{пов}}} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{D}{h_0}} =
 \end{aligned}$$

$$\frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{5}{37} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{256,68}{3200}}\right)\right) \times 3200}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{256,68}{3200}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times 12,76}{37}\right) + \frac{3200}{256,68} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{37}{12,76}} = 334,72 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{E_{\text{пов}}}{E_{\text{тр}}} = \frac{334,72}{272,8} = 1,23; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1,23 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 30,85\%$$

Прочность по критерию допустимого упругого прогиба конструкции обеспечена.

Расчёт на сдвигустойчивость

Нижний слой основания

Материал: Подобранная песчано-гравийная смесь № С4 (ГОСТ 25607)

$E = 180,0 \text{ МПа}$, $\phi = 45,00^\circ$, $c = 0,02000 \text{ МПа}$

Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 13]:

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^3 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^3 h_i} = \frac{550 \times 5 + 460 \times 9 + 275 \times 15}{5 + 9 + 15} = 379,8 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки [1, номогр. 3]:

$$\frac{E_{\text{в}}}{E} = \frac{379,8}{180} = 2,11; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{29}{37} = 0,78; \quad \tau_{\text{н}} \approx 0,04389 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от собственного веса дорожной одежды [1, номогр. 1]:

$$\tau_{\text{в}} \approx -0,002 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 10]

$$T = \tau_{\text{н}} \times p + \tau_{\text{в}} = 0,04389 \times 0,6 - 0,00203 = 0,0243 \text{ МПа}$$

Коэффициент, учитывающий снижение сопротивления грунта сдвигу под агрессивным действием подвижных нагрузок, $k_1 = 0,6$

Коэффициент запаса на неоднородность условия работы конструкции $k_2 = 0,8$

Коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе, $k_3 = 5$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 11]

$$T_{\text{пр}} = c_{\text{н}} \times k_1 \times k_2 \times k_3 = 0,02 \times 0,6 \times 0,8 \times 5 \approx 0,048 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,048}{0,0243} = 1,97; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1,97 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 109,6\%$$

Прочность по критерию сдвигустойчивости слоя обеспечена.

Грунт земляного полотна

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

$E = 120,0 \text{ МПа}$, $\phi = 40,00^\circ$, $c = 0,00600 \text{ МПа}$

Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 13]:

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^4 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^4 h_i} = \frac{550 \times 5 + 460 \times 9 + 275 \times 15 + 180 \times 20}{5 + 9 + 15 + 20} = 298,3 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки [1, номогр. 3]:

$$\frac{E_{\text{в}}}{E} = \frac{298,3}{120} = 2,49; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{49}{37} = 1,32; \quad \tau_{\text{н}} \approx 0,03062 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от собственного веса дорожной одежды

[1, номогр. 1]:

$$\tau_{\text{в}} \approx -0,0034 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 10]

$$T = \tau_{\text{н}} \times p + \tau_{\text{в}} = 0,03062 \times 0,6 - 0,00343 = 0,01494 \text{ МПа}$$

Коэффициент, учитывающий снижение сопротивления грунта сдвигу под агрессивным действием подвижных нагрузок, $k_1 = 0,6$

Коэффициент запаса на неоднородность условия работы конструкции $k_2 = 0,8$

Коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе, $k_3 = 6$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 11]

$$T_{\text{пр}} = c_{\text{н}} \times k_1 \times k_2 \times k_3 = 0,006 \times 0,6 \times 0,8 \times 6 \approx 0,01728 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,01728}{0,01494} = 1,16; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1,16 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 23,4\%$$

Прочность по критерию сдвигоустойчивости грунта земляного полотна обеспечена.

Расчёт на статическую нагрузку

Нижний слой основания

Материал: Подобранная песчано-гравийная смесь № С4 (ГОСТ 25607)

$E = 180,0 \text{ МПа}$, $\phi = 45,00^\circ$, $c = 0,02000 \text{ МПа}$

Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 13]:

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^3 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^3 h_i} = \frac{300 \times 5 + 280 \times 9 + 275 \times 15}{5 + 9 + 15} = 280,9 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки [1, номогр. 3]:

$$\frac{E_{\text{в}}}{E} = \frac{280,9}{180} = 1,56; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{29}{33} = 0,88; \quad \tau_{\text{н}} \approx 0,0408 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от собственного веса дорожной одежды [1, номогр. 1]:

$$\tau_{\text{в}} \approx -0,002 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 10]

$$T = \tau_{\text{н}} \times p + \tau_{\text{в}} = 0,0408 \times 0,6 - 0,00203 = 0,02245 \text{ МПа}$$

Коэффициент, учитывающий снижение сопротивления грунта сдвигу под агрессивным действием подвижных нагрузок, $k_1 = 0,9$

Коэффициент запаса на неоднородность условия работы конструкции $k_2 = 1,23$

Коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе, $k_3 = 5$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 11]

$$T_{\text{пр}} = c_{\text{н}} \times k_1 \times k_2 \times k_3 = 0,02 \times 0,9 \times 1,23 \times 5 \approx 0,1107 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,1107}{0,02245} = 4,93; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{4,93 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 424,5\%$$

Прочность по критерию сдвигоустойчивости слоя обеспечена.

Грунт земляного полотна

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

$E = 120,0 \text{ МПа}$, $\phi = 40,00^\circ$, $c = 0,00600 \text{ МПа}$

Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 13]:

$$E_b = \frac{\sum_{i=1}^4 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^4 h_i} = \frac{300 \times 5 + 280 \times 9 + 275 \times 15 + 180 \times 20}{5 + 9 + 15 + 20} = 239,7 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки [1, номогр. 3]:

$$\frac{E_b}{E} = \frac{239,7}{120} = 2; \quad \frac{h_b}{D} = \frac{49}{33} = 1,48; \quad \tau_n \approx 0,03822 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от собственного веса дорожной одежды [1, номогр. 1]:

$$\tau_b \approx -0,0023 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 10]

$$T = \tau_n \times p + \tau_b = 0,03822 \times 0,6 - 0,00225 = 0,02068 \text{ МПа}$$

Коэффициент, учитывающий снижение сопротивления грунта сдвигу под агрессивным действием подвижных нагрузок, $k_1 = 0,9$

Коэффициент запаса на неоднородность условия работы конструкции $k_2 = 1,23$

Коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе, $k_3 = 6$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 11]

$$T_{пр} = c_n \times k_1 \times k_2 \times k_3 = 0,004 \times 0,9 \times 1,23 \times 6 \approx 0,02657 \text{ МПа}$$

$$K_{расч} = \frac{T_{пр}}{T} = \frac{0,02657}{0,02068} = 1,29; \quad \frac{K_{расч} - K_{тр}}{K_{тр}} \times 100\% = \frac{1,29 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 37,2\%$$

Прочность по критерию сдвигоустойчивости грунта земляного полотна обеспечена.

Расчёт на изгиб

Материал нижнего слоя монолитного блока: Асфальтобетон горячей укладки пористый из крупнозернистой щебёночной (гравийной) смеси марка битума БНД-70/100 (СП РК 3.03-104-2014)

Нормативное сопротивление весной $R_0 = 1,6 \text{ МПа}$

Коэффициент снижения прочности $k_2 = 0,8$

Расчётная приведённая интенсивность движения на последний год службы [1, формула 12]

$$N_t = N_p \times q^{T_{сл} - 1} = 550 \times 1,04^{14 - 1} = 915,79$$

Коэффициент усталости [1, формула 16]

Параметр уравнения $\phi = 0,16$

$$K_y = \left(\frac{N_t}{1000}\right)^{-\phi} = \left(\frac{915,8}{1000}\right)^{-0,16} = 1,01$$

Прочность материала монолитного слоя при многократном растяжении при изгибе [1, формула 15]

$$R_n = R_0 \times (1 - v_r \times t) \times K_y \times k_2 = 1,6 \times (1 - 0,1 \times 1,32) \times 1,01 \times 0,8 = 1,127 \text{ МПа}$$

$$E_b = \frac{\sum_{i=1}^2 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^2 h_i} = \frac{4500 \times 5 + 2800 \times 9}{5 + 9} = 3407,1 \text{ МПа}$$

Общий модуль упругости основания $E_{общ} = 165,2 \text{ МПа}$

Растягивающее напряжение от единичной нагрузки при расчётных диаметрах площадки, передающей нагрузку [1, номогр. 6]

$$\frac{E_b}{E_{общ}} = \frac{3407,1}{165,2} = 20,6; \quad \frac{h}{D} = \frac{14}{37} = 0,38; \quad \overline{\sigma_r} = 2,21 \text{ МПа}$$

Расчётное напряжение [1, формула 14]

$$\sigma_r = \overline{\sigma_r} \times p \times k_b = 2,21 \times 0,6 \times 0,85 = 1,128 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{R_n}{\sigma_r} = \frac{1,127}{1,128} = 1; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 6,28\%$$

Прочность по критерию растяжения при изгибе монолитных слоёв конструкции обеспечена.

Расчёт колеиности

Коэффициент суммирования $K_c = 12,01$

Суммарное число приложений расчётных нагрузок [2, формула 3.2]

$$N_c = 0,6 \times f_{\text{пол}} \times N_1 \times \frac{K_c}{q^{T-1}} \times T_{\text{рдг}} = 0,6 \times 0,55 \times 1000 \times \frac{12,01}{1,04^{10-1}} \times 205 = 570835,21$$

Расчёт остаточных деформаций в грунте

Исходное значение остаточной осадки $h_{\text{г.отн.}} = 0,0081 \text{ м}$ [2, номогр. 3.2]

Средневзвешенный модуль упругости дорожной одежды [2, формула 3.4]

$$E_d = \frac{3200 \times 5 + 2000 \times 9 + 275 \times 15 + 180 \times 20}{5 + 9 + 15 + 20} = 851,5 \text{ МПа}$$

Коэффициент, учитывающий поправку на фактический модуль упругости $K_e = 1,25$ [2, табл. 3.4]

Коэффициент, учитывающий поправку на фактическую относительную толщину дорожной одежды $K_{\text{ha}} = 1,21$ [2, табл. 3.5]

Остаточная осадка грунта [2, формула 3.3]

$$h_{\text{гр}} = h_{\text{г.отн.}} \times K_e \times K_{\text{ha}} = 0,0081 \times 1,2474 \times 1,2143 = 0,0122 \text{ м}$$

Расчёт остаточных деформаций в монолитных слоях

Расчётное количество сдвигоопасных дней в году $T_{\text{рсг}} = 19$ [2, табл. 5.1]

Суммарное число приложений расчётных нагрузок [2, формула 3.1]

$$N_{\text{общ}} = 0,6 \times f_{\text{пол}} \times N_1 \times K_c \times T_{\text{рсг}} = 0,6 \times 0,55 \times 1000 \times 12,01 \times 19 = 75302,7$$

Длительность воздействия транспортной нагрузки $t_{\text{ц}} = 0,027 \text{ с}$ [2, табл. 5.3]

Фактическое суммарное число приложений расчётной нагрузки, приведённое к $t_{\text{ц}} = 0,01 \text{ с}$ [2, формула 5.2]

$$N_{\text{сф}} = \frac{N_{\text{общ}} \times t_{\text{ц}}}{0,01} = \frac{75302,7 \times 0,027}{0,01} = 203317,29$$

Исходная остаточная деформация $h_6 = 0 \text{ м}$ [2, номогр. 5.2]

Поправка на фактический коэффициент вязкого сопротивления $K_h = 1$ [2, табл. 5.4]

Коэффициент, учитывающий выпор асфальтобетона по краям колеи $K_{\text{вып}} = 1,3$

Остаточные деформации [2, формула 5.3]

$$h_{\text{кр}} = E_6 \times K_h \times K_{\text{вып}} = 0,00282 \times 1 \times 1,3 = 0,0037 \text{ м}$$

Расчёт относительной остаточной деформации 3-ого слоя

Материал: Смеси щебёночные с непрерывной гранулометрией С4 - 80 мм (для оснований)

Остаточные деформации [2, номогр. 4.2]

$$\frac{E_3}{E_r} = \frac{275}{120} = 2,29; \quad h_{\text{отн}} = 0,5; \quad h_m = h_{\text{отн}} \times h_r = 0,5 \times 0,0122 = 0,0061 \text{ м}$$

Расчёт относительной остаточной деформации 4-ого слоя

Материал: Подобранная песчано-гравийная смесь № С4 (ГОСТ 25607)

Остаточные деформации [2, номогр. 4.1]

$$\frac{E_4}{E_r} = \frac{180}{120} = 1,5; \quad h_{\text{отн}} = 0,96; \quad h_m = h_{\text{отн}} \times h_r = 0,96 \times 0,0122 = 0,0118 \text{ м}$$

Расчёт абсолютной остаточной деформации в слоях основания

$$h_{\text{осн}} = 0,0061 + 0,0118 = 0,0179 \text{ м}$$

Износ покрытия

Коэффициент $K_q = 1,17$ [2, табл. 5.7]

Общая фактическая интенсивность [2, формула 5.4]

$$N_{\text{общ}} = f_{\text{пол}} \times N_1 \times K_q = 0,55 \times 1000 \times 1,17 = 643,5$$

Среднегодовой износ покрытия $D_{\text{и.ср.}} = 0,0004$ м [2, табл. 5.6]

Износ покрытия за 14 лет [2, формула 5.5]

$$D_{\text{и}} = D_{\text{и.ср.}} \times T = 0,0004 \times 14 = 0,0056 \text{ м}$$

Общая глубина колеи

Коэффициент, учитывающий долю неравномерной остаточной деформации от общей осадки $K_{\text{но}} = 0,15$

Коэффициент перехода от средней величины остаточной деформации в продольном направлении к средней глубине колеи $K_{\text{п}} = 2,56$

Среднюю величину общей глубины колеи вычисляют на основе результатов расчёта остаточных деформаций в грунте земляного полотна и слоях дорожной одежды [2, формула 6.1]

$$h_{\text{общ}}^{\text{ср}} = ((h_{\text{гр}} + h_{\text{осн}}) \times K_{\text{но}} + h_{\text{кр}}) \times K_{\text{п}} + D_{\text{и}} = ((0,0179 + 0,0122) \times 0,15 + 0,004) \times 2,56 + 0,0056 = 0,027 \text{ м} = 2,7 \text{ см}$$

Предельно допустимая глубина колеи $h_{\text{общ}}^{\text{пп}} = 3,5$ см [2, табл. 5]

Допустимая глубина колеи $h_{\text{общ}}^{\text{д}} = 3$ см [2, табл. 5]

$$h_{\text{общ}}^{\text{пп}} - h_{\text{общ}}^{\text{ср}} = 3,5 - 2,7 = 0,8 \text{ см}$$

Глубина колеи не превышает предельно допустимое значение.

Вариант № 2

1) Верхний слой покрытия: 5,0 см

Асфальтобетон горячей укладки высокоплотный, из щебёночной (гравийной) смеси типа В, марка битума БНД/БН-100/130 (СП РК 3.03-104-2014)

2) Нижний слой покрытия: 9,0 см

Асфальтобетон горячей укладки пористый из крупнозернистой щебёночной (гравийной) смеси марка битума БНД-100/130 (СП РК 3.03-104-2014)

3) Верхний слой основания: 10,0 см

Смеси гравийные с непрерывной гранулометрией С4 - 80 мм (для оснований)

4) Нижний слой основания: 31,0 см

Смеси гравийные с непрерывной гранулометрией С4 - 80 мм (для оснований)

Грунт земляного полотна

Песок средней крупности с содержанием пылевато-глинистой фракции 0%

Расчёт на упругий прогиб

Расчёт по допускаемому упругому прогибу ведём послойно, начиная с грунта.

$$\begin{aligned}
 h_3 &= 2 \times h_3 \times \sqrt[3]{\frac{E}{6 \times E_{\text{пов}}}} = 2 \times 31 \times \sqrt[3]{\frac{230}{6 \times 120}} = 42,38 \text{ см} \\
 E^3_{\text{пов}} &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{h_3}{D} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_3}}\right)\right) \times E_3}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_3}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times h_3}{D}\right) + \frac{E_3}{E_{\text{пов}}} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{D}{h_3}} = \\
 &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{31}{37} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{120}{230}}\right)\right) \times 230}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{120}{230}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times 42,38}{37}\right) + \frac{230}{120} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{37}{42,38}} = 164,48 \text{ МПа} \\
 h_3 &= 2 \times h_2 \times \sqrt[3]{\frac{E}{6 \times E_{\text{пов}}}} = 2 \times 10 \times \sqrt[3]{\frac{230}{6 \times 164,48}} = 12,31 \text{ см} \\
 E^2_{\text{пов}} &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{h_2}{D} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_2}}\right)\right) \times E_2}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_2}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times h_2}{D}\right) + \frac{E_2}{E_{\text{пов}}} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{D}{h_2}} = \\
 &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{10}{37} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{164,48}{230}}\right)\right) \times 230}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{164,48}{230}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times 12,31}{37}\right) + \frac{230}{164,48} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{37}{12,31}} = 174,46 \text{ МПа} \\
 h_3 &= 2 \times h_1 \times \sqrt[3]{\frac{E}{6 \times E_{\text{пов}}}} = 2 \times 9 \times \sqrt[3]{\frac{1400}{6 \times 174,46}} = 19,83 \text{ см} \\
 E^1_{\text{пов}} &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{h_1}{D} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_1}}\right)\right) \times E_1}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_1}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times h_1}{D}\right) + \frac{E_1}{E_{\text{пов}}} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{D}{h_1}} = \\
 &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{9}{37} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{174,46}{1400}}\right)\right) \times 1400}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{174,46}{1400}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times 19,83}{37}\right) + \frac{1400}{174,46} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{37}{19,83}} = 253,43 \text{ МПа} \\
 h_3 &= 2 \times h_0 \times \sqrt[3]{\frac{E}{6 \times E_{\text{пов}}}} = 2 \times 5 \times \sqrt[3]{\frac{2400}{6 \times 253,43}} = 11,64 \text{ см} \\
 E^0_{\text{пов}} &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{h_0}{D} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_0}}\right)\right) \times E_0}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_0}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times h_0}{D}\right) + \frac{E_0}{E_{\text{пов}}} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{D}{h_0}} =
 \end{aligned}$$

$$\frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{5}{37} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{253,43}{2400}}\right)\right) \times 2400}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{253,43}{2400}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times 11,64}{37}\right) + \frac{2400}{253,43} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{37}{11,64}} = 322,25 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{E_{\text{пов}}}{E_{\text{тр}}} = \frac{322,25}{272,8} = 1,18; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1,18 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 25,53\%$$

Прочность по критерию допустимого упругого прогиба конструкции обеспечена.

Расчёт на сдвигоустойчивость

Грунт земляного полотна

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

$E = 120,0 \text{ МПа}$, $\phi = 40,00^\circ$, $c = 0,00600 \text{ МПа}$

Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 13]:

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^4 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^4 h_i} = \frac{440 \times 5 + 380 \times 9 + 230 \times 10 + 230 \times 31}{5 + 9 + 10 + 31} = 273,6 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки [1, номогр. 3]:

$$\frac{E_{\text{в}}}{E} = \frac{273,6}{120} = 2,28; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{55}{37} = 1,49; \quad \tau_{\text{н}} \approx 0,02674 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от собственного веса дорожной одежды [1, номогр. 1]:

$$\tau_{\text{в}} \approx -0,0039 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 10]

$$T = \tau_{\text{н}} \times p + \tau_{\text{в}} = 0,02674 \times 0,6 - 0,00385 = 0,0122 \text{ МПа}$$

Коэффициент, учитывающий снижение сопротивления грунта сдвигу под агрессивным действием подвижных нагрузок, $k_1 = 0,6$

Коэффициент запаса на неоднородность условия работы конструкции $k_2 = 0,8$

Коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе, $k_3 = 6$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 11]

$$T_{\text{пр}} = c_{\text{н}} \times k_1 \times k_2 \times k_3 = 0,006 \times 0,6 \times 0,8 \times 6 \approx 0,01728 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,01728}{0,0122} = 1,42; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1,42 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 51,1\%$$

Прочность по критерию сдвигоустойчивости грунта земляного полотна обеспечена.

Расчёт на статическую нагрузку

Грунт земляного полотна

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

$E = 120,0 \text{ МПа}$, $\phi = 40,00^\circ$, $c = 0,00600 \text{ МПа}$

Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 13]:

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^4 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^4 h_i} = \frac{240 \times 5 + 280 \times 9 + 230 \times 10 + 230 \times 31}{5 + 9 + 10 + 31} = 239,1 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки [1, номогр. 3]:

$$\frac{E_b}{E} = \frac{239,1}{120} = 1,99; \quad \frac{h_b}{D} = \frac{55}{33} = 1,67; \quad \tau_n \approx 0,03231 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от собственного веса дорожной одежды [1, номогр. 1]:

$$\tau_b \approx -0,0025 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 10]

$$T = \tau_n \times p + \tau_b = 0,03231 \times 0,6 - 0,00253 = 0,01686 \text{ МПа}$$

Коэффициент, учитывающий снижение сопротивления грунта сдвигу под агрессивным действием подвижных нагрузок, $k_1 = 0,9$

Коэффициент запаса на неоднородность условия работы конструкции $k_2 = 1,23$

Коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе, $k_3 = 6$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 11]

$$T_{пр} = c_n \times k_1 \times k_2 \times k_3 = 0,004 \times 0,9 \times 1,23 \times 6 \approx 0,02657 \text{ МПа}$$

$$K_{расч} = \frac{T_{пр}}{T} = \frac{0,02657}{0,01686} = 1,58; \quad \frac{K_{расч} - K_{тр}}{K_{тр}} \times 100\% = \frac{1,58 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 68,1\%$$

Прочность по критерию сдвигоустойчивости грунта земляного полотна обеспечена.

Расчёт на изгиб

Материал нижнего слоя монолитного блока: Асфальтобетон горячей укладки пористый из крупнозернистой щебёночной (гравийной) смеси марка битума БНД-100/130 (СП РК 3.03-104-2014)

Нормативное сопротивление весной $R_0 = 1,4 \text{ МПа}$

Коэффициент снижения прочности $k_2 = 0,8$

Расчётная приведённая интенсивность движения на последний год службы [1, формула 12]

$$N_t = N_p \times q^{T_{сл} - 1} = 550 \times 1,04^{14 - 1} = 915,79$$

Коэффициент усталости [1, формула 16]

Параметр уравнения $\phi = 0,16$

$$K_y = \left(\frac{N_t}{1000}\right)^{-\phi} = \left(\frac{915,8}{1000}\right)^{-0,16} = 1,01$$

Прочность материала монолитного слоя при многократном растяжении при изгибе [1, формула 15]

$$R_n = R_0 \times (1 - v_r \times t) \times K_y \times k_2 = 1,4 \times (1 - 0,1 \times 1,32) \times 1,01 \times 0,8 = 0,986 \text{ МПа}$$

$$E_b = \frac{\sum_{i=1}^2 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^2 h_i} = \frac{3600 \times 5 + 2200 \times 9}{5 + 9} = 2700 \text{ МПа}$$

Общий модуль упругости основания $E_{общ} = 174,5 \text{ МПа}$

Растягивающее напряжение от единичной нагрузки при расчётных диаметрах площадки, передающей нагрузку [1, номогр. 6]

$$\frac{E_b}{E_{общ}} = \frac{2700}{174,5} = 15,5; \quad \frac{h}{D} = \frac{14}{37} = 0,38; \quad \sigma_r = 1,91 \text{ МПа}$$

Расчётное напряжение [1, формула 14]

$$\sigma_r = \sigma_r \times p \times k_b = 1,91 \times 0,6 \times 0,85 = 0,973 \text{ МПа}$$

$$K_{расч} = \frac{R_n}{\sigma_r} = \frac{0,986}{0,973} = 1,01; \quad \frac{K_{расч} - K_{тр}}{K_{тр}} \times 100\% = \frac{1,01 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 7,85\%$$

Прочность по критерию растяжения при изгибе монолитных слоёв конструкции обеспечена.

Расчёт колеиности

Коэффициент суммирования $K_c = 12,01$

Суммарное число приложений расчётных нагрузок [2, формула 3.2]

$$N_c = 0,6 \times f_{\text{пол}} \times N_1 \times \frac{K_c}{q^{T-1}} \times T_{\text{рдг}} = 0,6 \times 0,55 \times 1000 \times \frac{12,01}{1,04^{10-1}} \times 205 = 570835,21$$

Расчёт остаточных деформаций в грунте

Исходное значение остаточной осадки $h_{\text{г.отн.}} = 0,0081$ м [2, номогр. 3.2]

Средневзвешенный модуль упругости дорожной одежды [2, формула 3.4]

$$E_d = \frac{2400 \times 5 + 1400 \times 9 + 230 \times 10 + 230 \times 31}{5 + 9 + 10 + 31} = 618,7 \text{ МПа}$$

Коэффициент, учитывающий поправку на фактический модуль упругости $K_e = 1,37$ [2, табл. 3.4]

Коэффициент, учитывающий поправку на фактическую относительную толщину дорожной одежды $K_{\text{ha}} = 1,14$ [2, табл. 3.5]

Остаточная осадка грунта [2, формула 3.3]

$$h_{\text{гр}} = h_{\text{г.отн.}} \times K_e \times K_{\text{ha}} = 0,0081 \times 1,3699 \times 1,1365 = 0,0125 \text{ м}$$

Расчёт остаточных деформаций в монолитных слоях

Расчётное количество сдвигоопасных дней в году $T_{\text{рсг}} = 19$ [2, табл. 5.1]

Суммарное число приложений расчётных нагрузок [2, формула 3.1]

$$N_{\text{общ}} = 0,6 \times f_{\text{пол}} \times N_1 \times K_c \times T_{\text{рсг}} = 0,6 \times 0,55 \times 1000 \times 12,01 \times 19 = 75302,7$$

Длительность воздействия транспортной нагрузки $t_{\text{ц}} = 0,027$ с [2, табл. 5.3]

Фактическое суммарное число приложений расчётной нагрузки, приведённое к $t_{\text{ц}} = 0,01$ с [2, формула 5.2]

$$N_{\text{сф}} = \frac{N_{\text{общ}} \times t_{\text{ц}}}{0,01} = \frac{75302,7 \times 0,027}{0,01} = 203317,29$$

Исходная остаточная деформация $h_6 = 0$ м [2, номогр. 5.2]

Поправка на фактический коэффициент вязкого сопротивления $K_h = 1$ [2, табл. 5.4]

Коэффициент, учитывающий выпор асфальтобетона по краям колеи $K_{\text{вып}} = 1,3$

Остаточные деформации [2, формула 5.3]

$$h_{\text{кр}} = E_6 \times K_h \times K_{\text{вып}} = 0,00282 \times 1 \times 1,3 = 0,0037 \text{ м}$$

Расчёт относительной остаточной деформации 3-ого слоя

Материал: Смеси гравийные с непрерывной гранулометрией С4 - 80 мм (для оснований)

Остаточные деформации [2, номогр. 4.2]

$$\frac{E_3}{E_{\text{г}}} = \frac{230}{120} = 1,92; \quad h_{\text{отн}} = 0,24; \quad h_{\text{м}} = h_{\text{отн}} \times h_{\text{г}} = 0,24 \times 0,0125 = 0,003 \text{ м}$$

Расчёт относительной остаточной деформации 4-ого слоя

Материал: Смеси гравийные с непрерывной гранулометрией С4 - 80 мм (для оснований)

Остаточные деформации [2, номогр. 4.2]

$$\frac{E_4}{E_{\text{г}}} = \frac{230}{120} = 1,92; \quad h_{\text{отн}} = 0,97; \quad h_{\text{м}} = h_{\text{отн}} \times h_{\text{г}} = 0,97 \times 0,0125 = 0,0121 \text{ м}$$

Расчёт абсолютной остаточной деформации в слоях основания

$$h_{\text{осн}} = 0,0030 + 0,0121 = 0,0151 \text{ м}$$

Износ покрытия

Коэффициент $K_q = 1,17$ [2, табл. 5.7]

Общая фактическая интенсивность [2, формула 5.4]

$$N_{\text{общ}} = f_{\text{пол}} \times N_1 \times K_q = 0,55 \times 1000 \times 1,17 = 643,5$$

Среднегодовой износ покрытия $D_{\text{н.ср.}} = 0,0004$ м [2, табл. 5.6]

Износ покрытия за 14 лет [2, формула 5.5]

$$D_{\text{и}} = D_{\text{и.ср.}} \times T = 0,0004 \times 14 = 0,0056 \text{ м}$$

Общая глубина колеи

Коэффициент, учитывающий долю неравномерной остаточной деформации от общей осадки $K_{\text{но}} = 0.15$

Коэффициент перехода от средней величины остаточной деформации в продольном направлении к средней глубине колеи $K_{\text{п}} = 2.56$

Среднюю величину общей глубины колеи вычисляют на основе результатов расчёта остаточных деформаций в грунте земляного полотна и слоях дорожной одежды [2, формула 6.1]

$$h_{\text{общ}}^{\text{ср}} = ((h_{\text{гр}} + h_{\text{осн}}) \times K_{\text{но}} + h_{\text{кр}}) \times K_{\text{п}} + D_{\text{и}} = ((0,0151 + 0,0125) \times 0,15 + 0,004) \times 2,56 + 0,0056 = 0,026 \text{ м} = 2,6 \text{ см}$$

Предельно допустимая глубина колеи $h_{\text{общ}}^{\text{пр}} = 3,5 \text{ см}$ [2, табл. 5]

Допустимая глубина колеи $h_{\text{общ}}^{\text{д}} = 3 \text{ см}$ [2, табл. 5]

$$h_{\text{общ}}^{\text{пр}} - h_{\text{общ}}^{\text{ср}} = 3,5 - 2,6 = 0,9 \text{ см}$$

Глубина колеи не превышает предельно допустимое значение.

Вариант № 3

1) Верхний слой покрытия: 4,0 см

Асфальтобетон горячей укладки высокоплотный, из щебёночной (гравийной) смеси типа В, марка битума БНД/БН-130/200 (СП РК 3.03-104-2014)

2) Нижний слой покрытия: 6,0 см

Асфальтобетон горячей укладки пористый из крупнозернистой щебёночной (гравийной) смеси марка битума БНД-130/200 (СП РК 3.03-104-2014)

3) Верхний слой основания: 10,0 см

Щебень чёрный для оснований устроенный по способу пропитки вязким битумом и битумной эмульсией

4) Нижний слой основания: 32,0 см

Смеси гравийные с непрерывной гранулометрией С4 - 80 мм (для оснований)

Грунт земляного полотна

Песок средней крупности с содержанием пылевато-глинистой фракции 0%

Расчёт на упругий прогиб

Расчёт по допускаемому упругому прогибу ведём послойно, начиная с грунта.

$$\begin{aligned}
 h_3 &= 2 \times h_3 \times \sqrt[3]{\frac{E}{6 \times E_{\text{пов}}}} = 2 \times 32 \times \sqrt[3]{\frac{230}{6 \times 120}} = 43,75 \text{ см} \\
 E^3_{\text{пов}} &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{h_3}{D} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_3}}\right)\right) \times E_3}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_3}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times h_3}{D}\right) + \frac{E_3}{E_{\text{пов}}} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{D}{h_3}} = \\
 &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{32}{37} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{120}{230}}\right)\right) \times 230}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{120}{230}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times 43,75}{37}\right) + \frac{230}{120} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{37}{43,75}} = 165,64 \text{ МПа} \\
 h_3 &= 2 \times h_2 \times \sqrt[3]{\frac{E}{6 \times E_{\text{пов}}}} = 2 \times 10 \times \sqrt[3]{\frac{400}{6 \times 165,64}} = 14,77 \text{ см} \\
 E^2_{\text{пов}} &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{h_2}{D} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_2}}\right)\right) \times E_2}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_2}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times h_2}{D}\right) + \frac{E_2}{E_{\text{пов}}} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{D}{h_2}} = \\
 &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{10}{37} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{165,64}{400}}\right)\right) \times 400}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{165,64}{400}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times 14,77}{37}\right) + \frac{400}{165,64} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{37}{14,77}} = 199,39 \text{ МПа} \\
 h_3 &= 2 \times h_1 \times \sqrt[3]{\frac{E}{6 \times E_{\text{пов}}}} = 2 \times 6 \times \sqrt[3]{\frac{1100}{6 \times 199,39}} = 11,67 \text{ см} \\
 E^1_{\text{пов}} &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{h_1}{D} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_1}}\right)\right) \times E_1}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_1}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times h_1}{D}\right) + \frac{E_1}{E_{\text{пов}}} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{D}{h_1}} = \\
 &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{6}{37} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{199,39}{1100}}\right)\right) \times 1100}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{199,39}{1100}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times 11,67}{37}\right) + \frac{1100}{199,39} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{37}{11,67}} = 249,1 \text{ МПа} \\
 h_3 &= 2 \times h_0 \times \sqrt[3]{\frac{E}{6 \times E_{\text{пов}}}} = 2 \times 4 \times \sqrt[3]{\frac{1500}{6 \times 249,1}} = 8,01 \text{ см} \\
 E^0_{\text{пов}} &= \frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{h_0}{D} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_0}}\right)\right) \times E_0}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{E_{\text{пов}}}{E_0}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times h_0}{D}\right) + \frac{E_0}{E_{\text{пов}}} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{D}{h_0}} =
 \end{aligned}$$

$$\frac{\left(1,05 - 0,1 \times \frac{4}{37} \times \left(1 - \sqrt[3]{\frac{249,1}{1500}}\right)\right) \times 1500}{0,71 \times \sqrt[3]{\frac{249,1}{1500}} \times \arctg\left(\frac{1,35 \times 8,01}{37}\right) + \frac{1500}{249,1} \times \frac{2}{\pi} \times \arctg \frac{37}{8,01}} = 294,94 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{E_{\text{пов}}}{E_{\text{тр}}} = \frac{294,94}{272,8} = 1,08; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1,08 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 14,89\%$$

Прочность по критерию допустимого упругого прогиба конструкции обеспечена.

Расчёт на сдвигоустойчивость

Грунт земляного полотна

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

$E = 120,0$ МПа, $\phi = 40,00^\circ$, $c = 0,00600$ МПа

Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 13]:

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^4 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^4 h_i} = \frac{380 \times 4 + 340 \times 6 + 400 \times 10 + 230 \times 32}{4 + 6 + 10 + 32} = 286,9 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки [1, номогр. 3]:

$$\frac{E_{\text{в}}}{E} = \frac{286,9}{120} = 2,39; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{52}{37} = 1,41; \quad \tau_{\text{н}} \approx 0,02849 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от собственного веса дорожной одежды [1, номогр. 1]:

$$\tau_{\text{в}} \approx -0,0036 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 10]

$$T = \tau_{\text{н}} \times p + \tau_{\text{в}} = 0,02849 \times 0,6 - 0,00364 = 0,01345 \text{ МПа}$$

Коэффициент, учитывающий снижение сопротивления грунта сдвигу под агрессивным действием подвижных нагрузок, $k_1 = 0,6$

Коэффициент запаса на неоднородность условия работы конструкции $k_2 = 0,8$

Коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе, $k_3 = 6$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 11]

$$T_{\text{пр}} = c_{\text{н}} \times k_1 \times k_2 \times k_3 = 0,006 \times 0,6 \times 0,8 \times 6 \approx 0,01728 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,01728}{0,01345} = 1,28; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1,28 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 36,2\%$$

Прочность по критерию сдвигоустойчивости грунта земляного полотна обеспечена.

Расчёт на статическую нагрузку

Грунт земляного полотна

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

$E = 120,0$ МПа, $\phi = 40,00^\circ$, $c = 0,00600$ МПа

Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 13]:

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^4 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^4 h_i} = \frac{240 \times 4 + 280 \times 6 + 400 \times 10 + 230 \times 32}{4 + 6 + 10 + 32} = 269,2 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки [1, номогр. 3]:

$$\frac{E_b}{E} = \frac{269,2}{120} = 2,24; \quad \frac{h_b}{D} = \frac{52}{33} = 1,58; \quad \tau_n \approx 0,03351 \text{ МПа}$$

Удельное активное напряжение сдвига от собственного веса дорожной одежды [1, номогр. 1]:

$$\tau_b \approx -0,0024 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 10]

$$T = \tau_n \times p + \tau_b = 0,03351 \times 0,6 - 0,00239 = 0,01771 \text{ МПа}$$

Коэффициент, учитывающий снижение сопротивления грунта сдвигу под агрессивным действием подвижных нагрузок, $k_1 = 0,9$

Коэффициент запаса на неоднородность условия работы конструкции $k_2 = 1,23$

Коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе, $k_3 = 6$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 11]

$$T_{пр} = c_n \times k_1 \times k_2 \times k_3 = 0,004 \times 0,9 \times 1,23 \times 6 \approx 0,02657 \text{ МПа}$$

$$K_{расч} = \frac{T_{пр}}{T} = \frac{0,02657}{0,01771} = 1,5; \quad \frac{K_{расч} - K_{тр}}{K_{тр}} \times 100\% = \frac{1,5 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 59,6\%$$

Прочность по критерию сдвигоустойчивости грунта земляного полотна обеспечена.

Расчёт на изгиб

Материал нижнего слоя монолитного блока: Асфальтобетон горячей укладки пористый из крупнозернистой щебёночной (гравийной) смеси марка битума БНД-130/200 (СП РК 3.03-104-2014)

Нормативное сопротивление весной $R_0 = 1,2 \text{ МПа}$

Коэффициент снижения прочности $k_2 = 0,8$

Расчётная приведённая интенсивность движения на последний год службы [1, формула 12]

$$N_t = N_p \times q^{T_{сл} - 1} = 550 \times 1,04^{14 - 1} = 915,79$$

Коэффициент усталости [1, формула 16]

Параметр уравнения $\phi = 0,27$

$$K_y = \left(\frac{N_t}{1000}\right)^{-\phi} = \left(\frac{915,8}{1000}\right)^{-0,27} = 1,02$$

Прочность материала монолитного слоя при многократном растяжении при изгибе [1, формула 15]

$$R_n = R_0 \times (1 - v_r \times t) \times K_y \times k_2 = 1,2 \times (1 - 0,1 \times 1,32) \times 1,02 \times 0,8 = 0,853 \text{ МПа}$$

$$E_b = \frac{\sum_{i=1}^2 E_i \times h_i}{\sum_{i=1}^2 h_i} = \frac{2600 \times 4 + 1800 \times 6}{4 + 6} = 2120 \text{ МПа}$$

Общий модуль упругости основания $E_{общ} = 199,4 \text{ МПа}$

Растягивающее напряжение от единичной нагрузки при расчётных диаметрах площадки, передающей нагрузку [1, номогр. 6]

$$\frac{E_b}{E_{общ}} = \frac{2120}{199,4} = 10,6; \quad \frac{h}{D} = \frac{10}{37} = 0,27; \quad \sigma_r = 1,78 \text{ МПа}$$

Расчётное напряжение [1, формула 14]

$$\sigma_r = \sigma_r \times p \times k_b = 1,78 \times 0,6 \times 0,85 = 0,907 \text{ МПа}$$

$$K_{расч} = \frac{R_n}{\sigma_r} = \frac{0,853}{0,907} = 0,94; \quad \frac{K_{расч} - K_{тр}}{K_{тр}} \times 100\% = \frac{0,94 - 0,94}{0,94} \times 100\% = 0,12\%$$

Прочность по критерию растяжения при изгибе монолитных слоёв конструкции обеспечена.

Расчёт колеиности

Коэффициент суммирования $K_c = 12,01$

Суммарное число приложений расчётных нагрузок [2, формула 3.2]

$$N_c = 0,6 \times f_{\text{пол}} \times N_1 \times \frac{K_c}{q^{T-1}} \times T_{\text{рдг}} = 0,6 \times 0,55 \times 1000 \times \frac{12,01}{1,04^{10-1}} \times 205 = 570835,21$$

Расчёт остаточных деформаций в грунте

Исходное значение остаточной осадки $h_{\text{г.отн.}} = 0,0081$ м [2, номогр. 3.2]

Средневзвешенный модуль упругости дорожной одежды [2, формула 3.4]

$$E_d = \frac{1500 \times 4 + 1100 \times 6 + 400 \times 10 + 230 \times 32}{4 + 6 + 10 + 32} = 460,8 \text{ МПа}$$

Коэффициент, учитывающий поправку на фактический модуль упругости $K_e = 1,53$ [2, табл. 3.4]

Коэффициент, учитывающий поправку на фактическую относительную толщину дорожной одежды $K_{\text{на}} = 1,18$ [2, табл. 3.5]

Остаточная осадка грунта [2, формула 3.3]

$$h_{\text{гр}} = h_{\text{г.отн.}} \times K_e \times K_{\text{на}} = 0,0081 \times 1,5272 \times 1,1754 = 0,0145 \text{ м}$$

Расчёт остаточных деформаций в монолитных слоях

Расчётное количество сдвигоопасных дней в году $T_{\text{рсг}} = 19$ [2, табл. 5.1]

Суммарное число приложений расчётных нагрузок [2, формула 3.1]

$$N_{\text{общ}} = 0,6 \times f_{\text{пол}} \times N_1 \times K_c \times T_{\text{рсг}} = 0,6 \times 0,55 \times 1000 \times 12,01 \times 19 = 75302,7$$

Длительность воздействия транспортной нагрузки $t_{\text{ц}} = 0,027$ с [2, табл. 5.3]

Фактическое суммарное число приложений расчётной нагрузки, приведённое к $t_{\text{ц}} = 0,01$ с [2, формула 5.2]

$$N_{\text{сф}} = \frac{N_{\text{общ}} \times t_{\text{ц}}}{0,01} = \frac{75302,7 \times 0,027}{0,01} = 203317,29$$

Исходная остаточная деформация $h_6 = 0$ м [2, номогр. 5.2]

Поправка на фактический коэффициент вязкого сопротивления $K_h = 1$ [2, табл. 5.4]

Коэффициент, учитывающий выпор асфальтобетона по краям колеи $K_{\text{вып}} = 1,3$

Остаточные деформации [2, формула 5.3]

$$h_{\text{кр}} = E_6 \times K_h \times K_{\text{вып}} = 0,00282 \times 1 \times 1,3 = 0,0037 \text{ м}$$

Расчёт относительной остаточной деформации 3-ого слоя

Материал: Щебень чёрный для оснований устроенный по способу пропитки вязким битумом и битумной эмульсией

Остаточные деформации [2, номогр. 4.3]

$$\frac{E_3}{E_r} = \frac{400}{120} = 3,33; \quad h_{\text{отн}} = 0,21; \quad h_{\text{м}} = h_{\text{отн}} \times h_{\text{г}} = 0,21 \times 0,0145 = 0,0031 \text{ м}$$

Расчёт относительной остаточной деформации 4-ого слоя

Материал: Смеси гравийные с непрерывной гранулометрией С4 - 80 мм (для оснований)

Остаточные деформации [2, номогр. 4.2]

$$\frac{E_4}{E_r} = \frac{230}{120} = 1,92; \quad h_{\text{отн}} = 0,97; \quad h_{\text{м}} = h_{\text{отн}} \times h_{\text{г}} = 0,97 \times 0,0145 = 0,014 \text{ м}$$

Расчёт абсолютной остаточной деформации в слоях основания

$$h_{\text{осн}} = 0,0031 + 0,0140 = 0,0171 \text{ м}$$

Износ покрытия

Коэффициент $K_q = 1,17$ [2, табл. 5.7]

Общая фактическая интенсивность [2, формула 5.4]

$$N_{\text{общ}} = f_{\text{пол}} \times N_1 \times K_q = 0,55 \times 1000 \times 1,17 = 643,5$$

Среднегодовой износ покрытия $D_{\text{и.ср.}} = 0,0004$ м [2, табл. 5.6]

Износ покрытия за 14 лет [2, формула 5.5]

$$D_{\text{и}} = D_{\text{и.ср.}} \times T = 0,0004 \times 14 = 0,0056 \text{ м}$$

Общая глубина колеи

Коэффициент, учитывающий долю неравномерной остаточной деформации от общей осадки $K_{\text{но}} = 0.15$

Коэффициент перехода от средней величины остаточной деформации в продольном направлении к средней глубине колеи $K_{\text{п}} = 2.56$

Среднюю величину общей глубины колеи вычисляют на основе результатов расчёта остаточных деформаций в грунте земляного полотна и слоях дорожной одежды [2, формула 6.1]

$$h_{\text{общ}}^{\text{ср}} = ((h_{\text{гр}} + h_{\text{осн}}) \times K_{\text{но}} + h_{\text{кр}}) \times K_{\text{п}} + D_{\text{и}} = ((0,0171 + 0,0145) \times 0,15 + 0,004) \times 2,56 + 0,0056 = 0,027 \text{ м} = 2,7 \text{ см}$$

Предельно допустимая глубина колеи $h_{\text{общ}}^{\text{пр}} = 3,5 \text{ см}$ [2, табл. 5]

Допустимая глубина колеи $h_{\text{общ}}^{\text{д}} = 3 \text{ см}$ [2, табл. 5]

$$h_{\text{общ}}^{\text{пр}} - h_{\text{общ}}^{\text{ср}} = 3,5 - 2,7 = 0,8 \text{ см}$$

Глубина колеи не превышает предельно допустимое значение.

Система трансформации отходов				
№	Устройство/действие	Результативная физическая величина	Коэффициент приведения	Полученная интегральная
1	Один грузовой автомобиль перевезет/привезет в/из 1 до 2 м (СДП 200.046-02)	0	0.003	0
	Итого	0		0

Полученная суммарная интегральность: 1,04

Умножив эту же суммарную интегральность на коэффициент приведения, получим: 3627,09

Результатом приведенной интегральности является ее величина при условии ее приведения к единице: 286

Полученная величина приведения: 370

Рис. 1. Схема конструкции железобетонной плиты

Рис. 1. Схема конструкции железобетонной плиты. Показаны четыре слоя: 1 - верхний слой (верхнее армирование), 2 - средний слой (среднее армирование), 3 - нижний слой (нижнее армирование), 4 - нижний слой (нижнее армирование). Также показаны размеры: общая толщина 200 мм, высота защитного слоя 20 мм, высота армирования 100 мм, высота бетона 180 мм. Указаны также значения напряжений в бетоне и арматуре для каждого слоя.

Напряжения в бетоне:

- Слой 1: $\sigma_{\text{бет}} = 233 \text{ МПа}$
- Слой 2: $\sigma_{\text{бет}} = 287 \text{ МПа}$
- Слой 3: $\sigma_{\text{бет}} = 85 \text{ МПа}$
- Слой 4: $\sigma_{\text{бет}} = 102 \text{ МПа}$
- Слой 5: $\sigma_{\text{бет}} = 102 \text{ МПа}$

Напряжения в арматуре:

- Слой 1: $\sigma_{\text{арм}} = 2000 \text{ МПа}$
- Слой 2: $\sigma_{\text{арм}} = 275 \text{ МПа}$
- Слой 3: $\sigma_{\text{арм}} = 102 \text{ МПа}$
- Слой 4: $\sigma_{\text{арм}} = 102 \text{ МПа}$

Рис. 1. Схематическое изображение структуры железобетонной плиты. 1 – верхний слой (толщина 10 см), содержащий арматуру диаметром 10 мм; 2 – средний слой (толщина 10 см), содержащий арматуру диаметром 10 мм; 3 – нижний слой (толщина 7 см), содержащий арматуру диаметром 10 мм. Плита опирается на основание. Арматура имеет диаметр 10 мм, 12 мм, 14 мм, 16 мм, 18 мм, 20 мм, 22 мм, 24 мм, 26 мм, 28 мм, 30 мм, 32 мм, 34 мм, 36 мм, 38 мм, 40 мм, 42 мм, 44 мм, 46 мм, 48 мм, 50 мм.

Конструктивный план

1 – верхний слой бетона
2 – верхнее армирование
3 – теплоизоляция
4 – нижнее армирование
5 – нижний слой бетона

Горизонтальный разрез

1 – диаметр арматуры
2 – шаг арматуры
3 – диаметр арматуры
4 – шаг арматуры
5 – диаметр арматуры
6 – шаг арматуры

Список нормативных документов

1. СП РК 3.03–104–2014. Проектирование дорожных одежд нежесткого типа. — Введ. 2015–07–01. — Астана, 2015. — 81 с.
2. Рекомендации по выявлению и устранению колеи на жестких дорожных одеждах. — М.: Росавтодор, 2002. — 179 с.