Расчёт конструкции дорожной одежды

Исходные данные

Название объекта: Капитальные ремонт автомобильной дороги "Шацк-Тамбов, Рязанская область"

Район проектирования: Рязанская область

Выполняемые расчёты: На упругий прогиб, сдвиг, изгиб, стат. нагрузку, морозоустойчивость

Дорожно-климатическая зона: III - подзона 1

Схема увлажнения: Схема 1

Расчётная влажность грунта $W_{\text{р}}$: 0,65

Коэффициент уплотнения грунта: 1,00

Глубина промерзания грунтов, м: 1,40

Проектные данные

Техническая категория дороги: III категория

Тип дорожной одежды: Капитальный

Требуемые коэффициенты прочности при заданной надёжности $K_{\text{н}} = 0,95$ [1, табл. 3.1]:

Требуемый $K_{\text{пр}}$ (упругий прогиб): 1,17

Требуемый $K_{\text{пр}}$ (сдвиг, изгиб): 1

Коэффициент нормированного отклонения $t = 1,71$

Расчётный срок службы $T_{\text{сл}}$, лет: 15

Ширина проезжей части, м: 12,0

Расчётная нагрузка

Группа расчётной нагрузки № 2 [1, табл. П.1.1]:

Давление в шине p, МПа: 0,60

Диаметр отпечатка шины $D_{\text{дин.}}$, см: 39,00

Статическая нагрузка на ось Q, кН: 110,00

Суммарное число приложений нагрузки

$\sum N_p = 2000000$ ед.

Требуемый модуль упругости

$$E_{\text{тр}} = 98,65 \times (\lg \sum N_p - c) = 98,65 \times (\lg 2000000 - 3,25) \approx 300,98 \text{ МПа}$$

Применение технологии "ANT"

Расчётные параметры конструкции на момент замера фактического числа приложений расчётной нагрузки (на 1 год службы)

1) Покрытие: 5,0 см

Асфальтобетон горячей укладки плотный I марки, из щебёночной (гравийной) смеси типа А, марка битума БНД/БН-60/90, E = 3200,0 МПа

2) Покрытие: 7,0 см

Асфальтобетон горячей укладки пористый I марки из крупнозернистой щебёночной (гравийной) смеси марка битума БНД-60/90, E = 2000,0 МПа

3) Новый слой основания: 20,0 см

АГБ-смесь, укрепленная стабилизатором "ANT" (0,007%) совместно в цементом (3%). , E = 1400,0 МПа

4) Существующее основание: 20,0 см

Щебень известняковый фр. 5-80 мм с содержанием известняковой муки более 30%, E = 200,0 МПа

5) Существующее основание: 25,0 см

Песок средней крупности, с содержанием пылевато-глинистой фракции 5%

$E = 70,0$ МПа, $\phi = 26,00°$, $\phi_{\text{стат.}} = 33,00°$, $c = 0,00200$ МПа

Грунт земляного полотна

Суглинок тяжёлый

$E = 50,0$ МПа, $\phi = 7,00°$, $\phi_{\text{стат.}} = 21,00°$, $c = 0,00900$ МПа

Расчёт на упругий прогиб

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

[1, номогр. 3.1]

$$\frac{E_{\text{н}}}{E_{\text{в}}} = \frac{E_{\text{г}}}{E_5} = \frac{50}{70} = 0,71; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{h_5}{D} = \frac{25}{39} = 0,64; \quad \frac{E_{\text{пов}}}{E_{\text{в}}} = \frac{E^4_{\text{пов}}}{E_5} \approx 0,8323$$

$$E^4_{\text{пов}} = 0,8323 \times 70 = 58,26 \text{ МПа}$$

[1, номогр. 3.1]

$$\frac{E_{\text{н}}}{E_{\text{в}}} = \frac{E_5}{E_4} = \frac{58,26}{200} = 0,29; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{h_4}{D} = \frac{20}{39} = 0,51; \quad \frac{E_{\text{пов}}}{E_{\text{в}}} = \frac{E^3_{\text{пов}}}{E_4} \approx 0,462$$

$$E^3_{\text{пов}} = 0,462 \times 200 = 92,4 \text{ МПа}$$

[1, номогр. 3.1]

$$\frac{E_{\text{н}}}{E_{\text{в}}} = \frac{E_4}{E_3} = \frac{92,4}{1400} = 0,07; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{h_3}{D} = \frac{20}{39} = 0,51; \quad \frac{E_{\text{пов}}}{E_{\text{в}}} = \frac{E^2_{\text{пов}}}{E_3} \approx 0,1736$$

$$E^2_{\text{пов}} = 0,1736 \times 1400 = 243,04 \text{ МПа}$$

[1, номогр. 3.1]

$$\frac{E_{\text{н}}}{E_{\text{в}}} = \frac{E_3}{E_2} = \frac{243,04}{2000} = 0,12; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{h_2}{D} = \frac{7}{39} = 0,18; \quad \frac{E_{\text{пов}}}{E_{\text{в}}} = \frac{E^1_{\text{пов}}}{E_2} \approx 0,1532$$

$$E^1_{\text{пов}} = 0,1532 \times 2000 = 306,4 \text{ МПа}$$

[1, номогр. 3.1]

$$\frac{E_{\text{н}}}{E_{\text{в}}} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{306,4}{3200} = 0,1; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{h_1}{D} = \frac{5}{39} = 0,13; \quad \frac{E_{\text{пов}}}{E_{\text{в}}} = \frac{E^0_{\text{пов}}}{E_1} \approx 0,113$$

$$E^0_{\text{пов}} = 0,113 \times 3200 = 361,6 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{E_{\text{пов}}}{E_{\text{тр}}} = \frac{361,6}{300,98} = 1,2; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1,2 - 1,17}{1,17} \times 100\% = 2,56\%$$

Расчёт на сдвигоустойчивость

Существующее основание

Материал: Песок средней крупности, с содержанием пылевато-глинистой фракции 5%
$E = 70,0$ МПа, $\phi = 26,00°$, $\phi_{\text{стат.}} = 33,00°$, $c = 0,00200$ МПа
Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 3.12]:

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{4} E_i \times h_i}{\sum\limits_{i=1}^{4} h_i} = \frac{1100 \times 5 + 840 \times 7 + 900 \times 20 + 200 \times 20}{5 + 7 + 20 + 20} = 641,9 \text{ МПа}$$

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

$$\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{общ}}} = \frac{641,9}{58,3} = 11,02; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{52}{39} = 1,33; \quad \tau_{\text{н}} \approx 0,0174 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 3.13]

$$T = \tau_{\text{н}} \times p = 0,0174 \times 0,6 = 0,0104 \text{ МПа}$$

Коэффициент $k_d = 2$
Глубина расположения поверхности проверяемого слоя от верха конструкции

$$z_{\text{оп}} = 5 + 7 + 20 + 20 = 52\text{см}$$

Средневзвешенный удельный вес слоёв, расположенных выше проверяемого

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{2400 \times 5 + 2300 \times 7 + 2400 \times 20 + 1600 \times 20}{5 + 7 + 20 + 20} = 2079 \ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 0,0021 \ \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 3.14]

$$T_{\text{пр}} = k_d \times c_n + 0,1 \times \gamma_{\text{ср}} \times z_{\text{оп}} \times tg\phi_{\text{стат.}} = 2 \times 0,002 + 0,1 \times 0,0021 \times 52 \times tg33° \approx 0,011 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,011}{0,0104} = 1,06; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1,06-1}{1} \times 100\% = 6\%$$

Грунт земляного полотна
Материал: Суглинок тяжёлый
$E = 50,0$ МПа, $\phi = 7,00°$, $\phi_{\text{стат.}} = 21,00°$, $c = 0,00900$ МПа
Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 3.12]:

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{5} E_i \times h_i}{\sum\limits_{i=1}^{5} h_i} = \frac{1100 \times 5 + 840 \times 7 + 900 \times 20 + 200 \times 20 + 70 \times 25}{5 + 7 + 20 + 20 + 25} = 456,2 \text{ МПа}$$

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

$$\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{общ}}} = \frac{456,2}{50} = 9,12; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{77}{39} = 1,97; \quad \tau_{\text{н}} \approx 0,0182 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 3.13]

$$T = \tau_{\text{н}} \times p = 0,0182 \times 0,6 = 0,0109 \text{ МПа}$$

Коэффициент $k_d = 1$
Глубина расположения поверхности проверяемого слоя от верха конструкции

$$z_{\text{оп}} = 5 + 7 + 20 + 20 + 25 = 77\text{см}$$

Средневзвешенный удельный вес слоёв, расположенных выше проверяемого

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{2400 \times 5 + 2300 \times 7 + 2400 \times 20 + 1600 \times 20 + 1950 \times 25}{5 + 7 + 20 + 20 + 25} = 2037 \ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 0,002 \ \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 3.14]

$$T_{\text{пр}} = k_d \times c_n + 0,1 \times \gamma_{\text{ср}} \times z_{\text{оп}} \times tg\phi_{\text{стат.}} = 1 \times 0,009 + 0,1 \times 0,002 \times 77 \times tg21° \approx 0,015 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,015}{0,0109} = 1,38; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1,38-1}{1} \times 100\% = 38\%$$

Расчёт на статическую нагрузку

Существующее основание
Материал: Песок средней крупности, с содержанием пылевато-глинистой фракции 5%
$E = 70,0$ МПа, $\phi = 26,00°$, $\phi_{\text{стат.}} = 33,00°$, $c = 0,00200$ МПа
Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 3.12]:

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{4} E_i \times h_i}{\sum\limits_{i=1}^{4} h_i} = \frac{420 \times 5 + 320 \times 7 + 320 \times 20 + 200 \times 20}{5 + 7 + 20 + 20} = 283,5 \text{ МПа}$$

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

$$\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{общ}}} = \frac{283,5}{58,3} = 4,87; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{52}{34} = 1,53; \quad \tau_{\text{н}} \approx 0,0189 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 3.13]

$$T = \tau_{\text{н}} \times p = 0,0189 \times 0,6 = 0,0114 \text{ МПа}$$

Коэффициент $k_d = 2$
Глубина расположения поверхности проверяемого слоя от верха конструкции

$$z_{\text{оп}} = 5 + 7 + 20 + 20 = 52\text{см}$$

Средневзвешенный удельный вес слоёв, расположенных выше проверяемого

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{2400 \times 5 + 2300 \times 7 + 2400 \times 20 + 1600 \times 20}{5 + 7 + 20 + 20} = 2079 \ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 0,0021 \ \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 3.14]

$$T_{\text{пр}} = k_d \times c_n + 0,1 \times \gamma_{\text{ср}} \times z_{\text{оп}} \times tg\phi_{\text{стат.}} = 2 \times 0,005 + 0,1 \times 0,0021 \times 52 \times tg33^\circ \approx 0,017 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,017}{0,0114} = 1,5; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1,5 - 1}{1} \times 100\% = 50\%$$

Грунт земляного полотна
Материал: Суглинок тяжёлый
$E = 50,0$ МПа, $\phi = 7,00^\circ$, $\phi_{\text{стат.}} = 21,00^\circ$, $c = 0,00900$ МПа
Средневзвешенный модуль упругости верхних слоёв [1, формула 3.12]:

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{5} E_i \times h_i}{\sum\limits_{i=1}^{5} h_i} = \frac{420 \times 5 + 320 \times 7 + 320 \times 20 + 200 \times 20 + 70 \times 25}{5 + 7 + 20 + 20 + 25} = 214,2 \text{ МПа}$$

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

$$\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{общ}}} = \frac{214,2}{50} = 4,28; \quad \frac{h_{\text{в}}}{D} = \frac{77}{34} = 2,26; \quad \tau_{\text{н}} \approx 0,0133 \text{ МПа}$$

Активное напряжение сдвига [1, формула 3.13]

$$T = \tau_{\text{н}} \times p = 0,0133 \times 0,6 = 0,008 \text{ МПа}$$

Коэффициент $k_d = 1$

Глубина расположения поверхности проверяемого слоя от верха конструкции

$$z_{\text{оп}} = 5 + 7 + 20 + 20 + 25 = 77\text{см}$$

Средневзвешенный удельный вес слоёв, расположенных выше проверяемого

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{2400 \times 5 + 2300 \times 7 + 2400 \times 20 + 1600 \times 20 + 1950 \times 25}{5 + 7 + 20 + 20 + 25} = 2037\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 0,002\ \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$$

Предельное активное напряжение сдвига [1, формула 3.14]

$$T_{\text{пр}} = k_d \times c_n + 0,1 \times \gamma_{\text{ср}} \times z_{\text{оп}} \times tg\phi_{\text{стат.}} = 1 \times 0,024 + 0,1 \times 0,002 \times 77 \times tg21^\circ \approx 0,03\ \text{МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,03}{0,008} = 3,75; \quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{3,75 - 1}{1} \times 100\% = 275\%$$

Расчёт на изгиб

Материал нижнего слоя монолитного блока: АГБ-смесь, укрепленная стабилизатором "ANT" (0,007%) совместно в цементом (3%).

Нормативное сопротивление весной $R_0 = 6,53$ МПа

Коэффициент, учитывающий реальный режим растяжения повторной нагрузкой $\alpha = 6,3$ [1, табл. П.3.1]

Коэффициент, зависящий от свойств материала рассчитываемого монолитного слоя $m = 4$ [1, табл. П.3.1]

Коэффициент, учитывающий влияние на прочность усталостных процессов [1, формула 3.18]

$$k_1 = \frac{\alpha}{\sqrt[m]{(\sum N_p)}} = \frac{6,3}{\sqrt[4]{(2000000)}} = 0,168$$

Коэффициент снижения прочности $k_2 = 0,9$

Прочность материала монолитного слоя при многократном растяжении при изгибе [1, формула 3.17]

$$R_n = R_0 \times k_1 \times k_2 \times (1 - v_r \times t) = 6,53 \times 0,168 \times 0,95 \times (1 - 0,1 \times 1,71) = 0,862\ \text{МПа}$$

$$E_{\text{в}} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{3} E_i \times h_i}{\sum\limits_{i=1}^{3} h_i} = \frac{4500 \times 5 + 2800 \times 7 + 2400 \times 20}{5 + 7 + 20} = 2815,6\ \text{МПа}$$

Общий модуль упругости основания $E_{\text{общ}} = 92,4$ МПа

Растягивающее напряжение от единичной нагрузки при расчётных диаметрах площадки, передающей нагрузку [1, номогр. 3.4]

$$\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{общ}}} = \frac{2815,6}{92,4} = 30,5;\ \frac{h}{D} = \frac{32}{39} = 0,82;\ \overline{\sigma_r} = 1,06 \text{ МПа}$$

Расчётное напряжение [1, формула 3.16]

$$\sigma_r = \overline{\sigma_r} \times p \times k_{\text{в}} = 1,06 \times 0,6 \times 0,85 = 0,54 \text{ МПа}$$

$$K_{\text{расч}} = \frac{R_n}{\sigma_r} = \frac{0,862}{0,54} = 1,6;\quad \frac{K_{\text{расч}} - K_{\text{тр}}}{K_{\text{тр}}} \times 100\% = \frac{1,6-1}{1} \times 100\% = 59,69\%$$

Результаты расчёта на морозоустойчивость

Материал грунта: Суглинок тяжёлый

Группа грунта по степени пучинистости 3

Высота насыпи 2,5 м, уровень грунтовых вод 3 м, толщина конструкции 0,77 м

Глубина грунтовых вод (от низа дорожной одежды) $H_y = 2,5 \text{ м} + 3 \text{ м} - 0,77 \text{ м} = 4,73 \text{ м}$

Величина морозного пучения при усреднённых условиях и глубине промерзания 1,40 м [1, номогр. 4.3]

$l_{\text{пуч.ср.2}} = 3,77$ см

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

$K_{\text{угв}} = 0,54$

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]

$K_{\text{гр}} = 1,3$

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

$K_{\text{нагр}} = 1,04$

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

$K_{\text{вл}} = 1,05$

Величина возможного морозного пучения [1, формула 4.2]

$$l_{\text{пуч}} = l_{\text{пуч.ср.}} \times K_{\text{угв}} \times K_{\text{пл}} \times K_{\text{гр}} \times \text{К}_{\text{нагр}} \times K_{\text{вл}} = 3,77 \times 0,54 \times 1 \times 1,3 \times 1,04 \times 1,05 = 2,89 \text{ см}$$

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

Ожидаемая пучинистость грунта 2,89 см $<$ 80% от допустимой 4,00 см

Морозоустойчивость конструкции обеспечена.

Список нормативных документов

1. ОДН 218.046-01 Проектирование нежёстких дорожных одежд.

2. ОДМ 218.5.003-2010 Рекомендации по применению геосинтетических материалов при строительстве и ремонте автомобильных дорог.