

## 8 РАСЧЁТ ПО УСЛОВИЮ СДВИГОУСТОЙЧИВОСТИ СЛОЁВ С ПОНИЖЕННОЙ СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬЮ СДВИГУ

К слоям дорожной конструкции с пониженной сопротивляемостью сдвигу относятся малосвязные (песчаные, гравийные) слои дорожной одежды и подстилающий грунт земляного полотна. Необходимо, чтобы под действием нагрузок в этих слоях за весь срок службы не накапливались недопустимые остаточные деформации формоизменения. Недопустимые деформации сдвига в конструкции не будут накапливаться, если в грунте земляного полотна и в малосвязных слоях будет обеспечено условие (5.2):

$$K_{\text{пр}} \geq K_{\text{пр}}^{\text{тр}},$$

где коэффициент прочности  $K_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{доп}}}{T}$ ,  $T$  – расчётное (максимальное) активное напряжение сдвига (часть сдвигающего напряжения, непогашенная внутренним трением) в расчётной (наиболее опасной) точке конструкции от действующей временной нагрузки;  $T_{\text{доп}}$  – допускаемая (предельная) величина активного напряжения сдвига (в той же точке), превышение которой вызывает нарушение прочности на сдвиг. Тогда

$$\frac{T_{\text{доп}}}{T} > K_{\text{пр}}^{\text{тр}}. \quad (8.1)$$

Требуемый коэффициент прочности  $K_{\text{пр}}^{\text{тр}}$  назначают по табл. 5.1 (ОДН 218.046-01, табл. 3.1), в зависимости от типа дорожной одежды, категории дороги, заданной надёжности и вида расчёта (по критерию сдвига и растяжения при изгибе).

Напряжения в конструктивных слоях и в подстилающем грунте от воздействия транспортной нагрузки вычисляют по формулам теории упругости для слоистой среды, нагруженной равномерно распределённой нагрузкой через гибкий круглый штамп, с учётом условий на контакте слоёв.

Действующие в слое активные напряжения сдвига  $T$  вычисляют по формуле

$$T = \bar{\tau}_n \cdot p \quad (8.2)$$

где  $\bar{\tau}_n$  – активное напряжение сдвига от единичной временной нагрузки, определяемое с помощью номограммы, представленной на рис. 8.1 или 8.2;  $p$  – расчётное давление от колеса на покрытие (0,8 МПа для капитальных дорожных одежд и 0,6 МПа для всех остальных типов).

Предельное (допускаемое) активное напряжение сдвига  $T_{\text{доп}}$  в грунте рабочего слоя (или в песчаном материале промежуточного слоя) определяют по формуле

$$T_{\text{доп}} = c_N \cdot k_d + 0,1\gamma_{\text{ср}} \cdot z_{\text{оп}} \cdot \text{tg } \varphi_{\text{ст}}, \quad (8.3)$$

где  $c_N$  – сцепление в грунте проверяемого слоя при числе приложений кратковременной нагрузки  $\Sigma N_p$ , МПа;  $k_d$  – коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе песчаного слоя с нижним слоем несущего основания;  $z_{\text{оп}}$  – глубина расположения поверхности слоя, проверяемого на сдвигустойчивость, от верха конструкции, см;  $\gamma_{\text{ср}}$  – средневзвешенный удельный вес конструктивных слоёв, расположенных выше проверяемого слоя, кг/см<sup>3</sup>;  $\varphi_{\text{ст}}$  – расчётная величина угла внутреннего трения материала проверяемого слоя при статическом действии нагрузки; 0,1 – коэффициент для перевода в МПа.

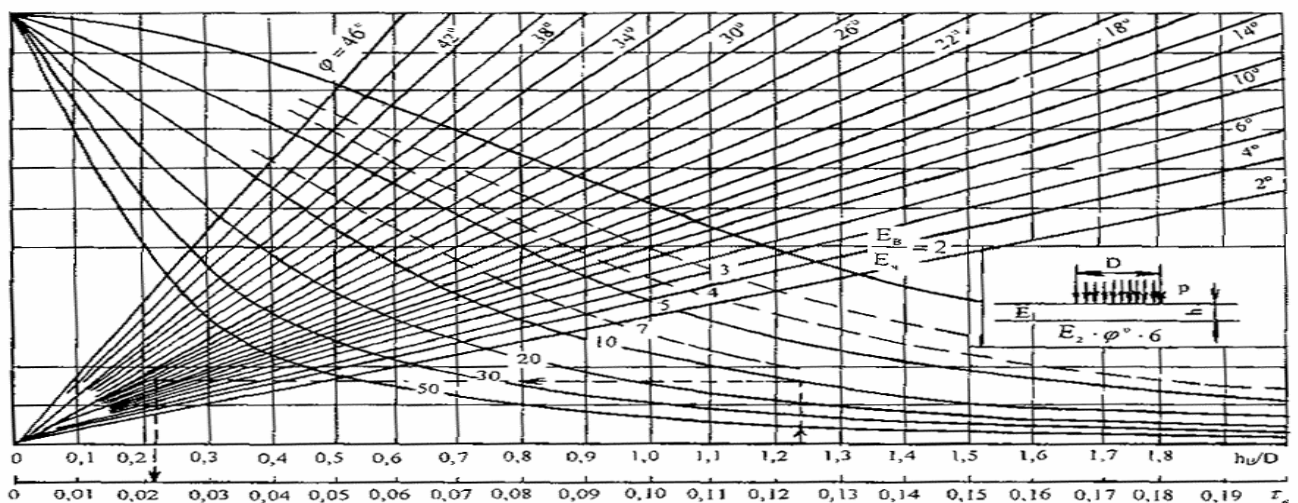


Рисунок 8.1 – Номограмма для определения  $\bar{\tau}_H$  (ОДН 218.046-01, рис. 3.2)

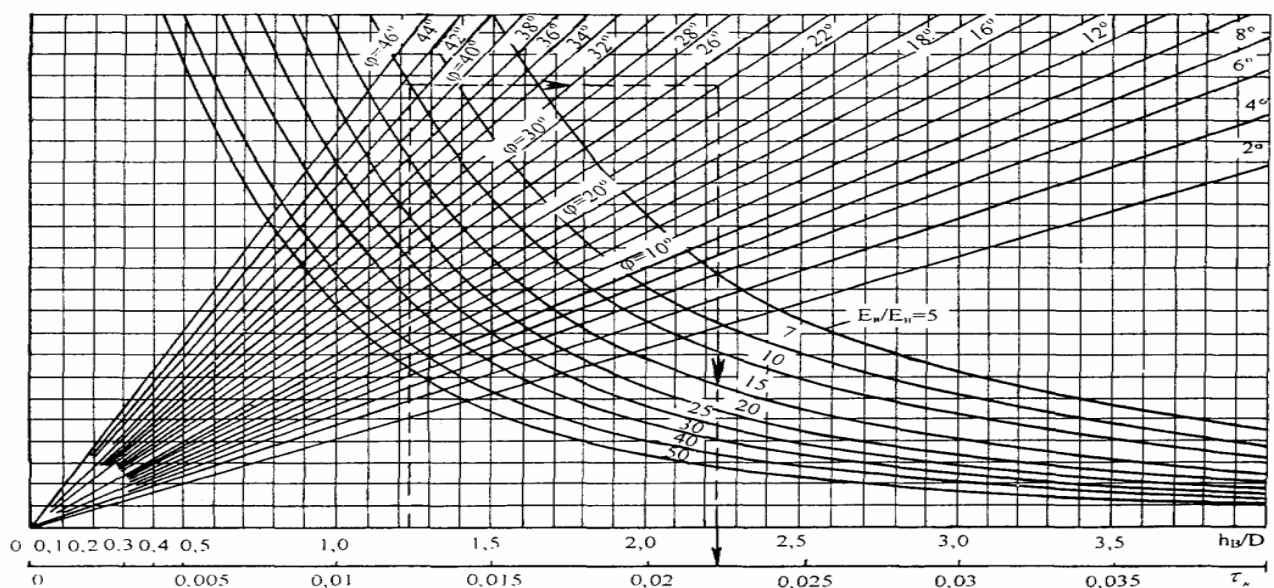


Рисунок 8.2 – Номограмма на большем диапазоне (ОДН 218.046-01, рис. 3.3)

Если дополнительный слой основания устраивается песчаным, а нижний слой несущего основания из укрепленных материалов или между основанием и песчаным слоем укладывают геотекстильную прослойку, то коэффициент  $k_d$ , должен принимать значения в соответствии с табл. 8.1.

Таблица 8.1 – Значения коэффициента  $k_d$  (ОДН 218.046-01, п.3.35)

$k_d$	Особенности грунта дополнительного слоя основания
4,5	при использовании в песчаном слое крупного песка
4,0	при использовании в песчаном слое песка средней крупности
3,0	при использовании в песчаном слое мелкого песка
1,0	во всех остальных случаях

Для того, чтобы воспользоваться номограммой (рис. 8.1 или 8.2), необходимо предварительно назначенную дорожную конструкцию привести к двухслойной расчётной модели. В ней, при расчёте на сдвиг в подстилающем слое, 1-й слой – это вся конструкция дорожной одежды, 2-й слой – подстилающий грунт. Тогда толщину верхнего слоя  $h_b$  принимают равной сумме толщин всех слоёв одежды:

$$h_b = \sum_{i=1}^n h_i, \quad (8.4)$$

где  $n$  – число слоёв дорожной одежды;  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя. Модуль упругости верхнего слоя модели вычисляют, как средневзвешенный, по формуле

$$E_b = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}, \quad (8.5)$$

где  $E_i$  – модуль упругости  $i$ -го слоя дорожной одежды. Средневзвешенный удельный вес конструктивных слоёв, расположенных выше проверяемого слоя, оценивается по формуле

$$\gamma_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_{cp} \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}, \quad (8.6)$$

где  $\gamma_i$  – удельный вес  $i$ -го слоя конструкции.

При расчёте по условию сдвигоустойчивости в *дополнительном слое* основания нижнему слою двухслойной модели условно присваивают обычные характеристики материала дополнительного слоя основания, а модуль упругости принимают равным общему модулю на поверхности дополнительного слоя, определяемому как в расчётах по упругому прогибу по номограмме (рис. 7.1). Толщину

верхнего слоя модели принимают равной общей толщине слоёв, лежащих над дополнительным

$$h_b = \sum_{i=1}^{n-1} h_i, \quad (8.7)$$

модуль упругости  $E_b$  вычисляют как средневзвешенное значение для этих слоев

$$E_b = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} E_i \cdot h_i}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i}, \quad (8.8)$$

удельный вес конструктивных слоев, расположенных выше проверяемого слоя

$$\gamma_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \gamma_{cp} \cdot h_i}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i}. \quad (8.9)$$

Расчёт дорожной одежды по сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна, а также в слабосвязных материалах промежуточных слоев дорожных одежд, ведут в следующей последовательности:

1. Приводят многослойную конструкцию к двухслойной модели.
2. По номограмме (рис. 8.1) или (рис. 8.2) определяют активные напряжения сдвига  $\bar{\tau}_n$  от единичной временной нагрузки.
3. По формуле (8.2) вычисляют расчётное напряжение сдвига в грунте земляного полотна или в песчаном слое одежды.
4. По формуле (8.3) вычисляют предельное напряжение сдвига.
5. По критерию (8.1) проверяют выполнение условия прочности (по заданному коэффициенту надёжности).
6. При невыполнении критерия изменяют толщины конструктивных слоёв, подбирают конструкцию, удовлетворяющую условию.

### **Пример 8.1 Расчёт капитальных дорожных одежд по условию сдвига в подстилающем слое**

Необходимо рассчитать конструкцию дорожной одежды, представленную в табл. 8.2 (табл. 6.1) на прочность по условию сдвига в подстилающем слое. В примере 7.1 она была рассчитана на прочность по критерию упругого прогиба. Коэффициент надёжности  $K_n=0,95$ . Требуемый минимальный коэффициент прочности для расчёта по условию сдвига, согласно табл. 5.1, составляет  $K_{np}^{TP} = 1,0$ .

Приводим нашу конструкцию к двухслойной модели. Толщина верхнего слоя

$$h_b = \sum_{i=1}^5 h_i = 0,07 + 0,10 + 0,18 + 0,28 + 0,50 = 1,13 \text{ м.}$$

Модуль упругости верхнего слоя модели вычисляем по формуле (8.5),

$$E_b = \frac{1200 \cdot 7 + 800 \cdot 10 + 600 \cdot 18 + 400 \cdot 28 + 130 \cdot 50}{113} = 397 \text{ МПа.}$$

Таблица 8.2 (табл. 6.1) – Исходные данные для слоёв дорожной одежды

№	Материал слоя	h, см	$\gamma$ , кг/см <sup>3</sup>	По упруг. прогибу, E, МПа	По усл. сдвиго- уст., E, МПа	Расчёт на растяжение при изгибе			
						E, МПа	R <sub>0</sub> , МПа	$\alpha$	m
1	Асфальтобетон плотный мелкозернистый, тип А марка I, БНД 90/130	7	0,0024	2400	1200	3600	9,5	5,4	5,0
2	Асфальтобетон пористый марка II, БНД 90/130	10	0,0023	1400	800	2200	7,8	6,3	4,0
3	Чёрный щебень в заклинку фр. 40-70, БНД 90/130	18	0,002	600	600	600	-	-	-
4	Щебёночно-гравийно- песчаная смесь, обрабо- танная цементом марки 20	28	0,002	400	400	400	-	-	-
5	Песок крупный с содер- жанием пылевато- глинистой фракции 5%. При динамическом воздей- ствии: $c_N = 0,003$ МПа; $\varphi = 28^\circ$ . При статическом воздей- ствии: $\varphi_{ст} = 34^\circ$ .	50	0,002	130	130	130	-	-	-
	Подстилающий грунт зем- ляного полотна - супесь пылеватая Расчётная влажность: $W_p = 0,8W_t$ ; При динамическом воздей- ствии: $c_N = 0,003$ МПа; $\varphi = 12^\circ$ . При статическом воздей- ствии: $\varphi_{ст} = 34^\circ$ .	-		32	32	32	-	-	-

По отношениям  $\frac{E_b}{E_n} = \frac{397}{32} = 12,4$ ;  $\frac{h_b}{D} = \frac{113}{39} = 2,9$  и при  $\varphi = 12^\circ$  с помощью номограммы (рис. 8.2) находим удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки:  $\bar{\tau}_n = 0,008$  МПа.

Таким образом,  $T = 0,008 \cdot 0,8 = 0,0064$  МПа.

Предельное активное напряжение сдвига  $T_{пр}$  в грунте рабочего слоя определяем по формуле (8.3), где  $c_N = 0,003$  МПа,  $k_d = 1,0$ ;  $z_{оп} = 7 + 10 + 18 + 28 + 50 = 113$  см;  $\varphi_{ст} = 34^\circ$ ;

$$\gamma_{ср} = \frac{0,0024 \cdot 7 + 0,0023 \cdot 9 + 0,002 \cdot 18 + 0,002 \cdot 28 + 0,002 \cdot 50}{113} = 0,002 \text{ кг/см}^3.$$

$$T_{доп} = 0,003 \cdot 1,0 + 0,1 \cdot 0,002 \cdot 113 \cdot \text{tg } 34^\circ = 0,018 \text{ МПа.}$$

$$K_{пр} = \frac{T_{доп}}{T} = \frac{0,018}{0,0064} = 2,81, \text{ что больше } K_{пр}^{тр} = 1,00.$$

Следовательно, конструкция удовлетворяет условию прочности по сдвигу в подстилающем слое.

### Пример 8.2 Расчёт капитальных дорожных одежд по условию сдвига в дополнительном песчаном слое

Рассчитаем эту же конструкцию дорожной одежды (табл. 8.2) на прочность по условию сдвига в песчаном слое. Требуемый минимальный коэффициент прочности для расчета по условию сдвига, остаётся тем же, то есть  $K_{пр}^{тр} = 1,0$ .

Приводим нашу конструкцию к двухслойной модели. Толщина верхнего слоя

$$h_b = \sum_{i=1}^4 h_i = 0,07 + 0,10 + 0,18 + 0,28 = 0,63 \text{ м.}$$

Модуль упругости верхнего слоя модели вычисляем по формуле (8.8),

$$E_b = \frac{1200 \cdot 7 + 800 \cdot 10 + 600 \cdot 18 + 400 \cdot 28}{63} = 610 \text{ МПа.}$$

Нижним слоем двухслойной модели является совокупность песчаного слоя и грунта земляного полотна. На границе между модельными верхним и нижним слоями (на поверхности песчаного слоя) требуемый модуль упругости согласно расчётам по упругому прогибу (пример 7.1)  $E_{общ}^{песок} = 79,3$  МПа. Тогда

$$\frac{E_b}{E_n} = \frac{610}{79} = 7,72; \quad \frac{h_b}{D} = \frac{63}{39} = 1,61 \text{ и при } \varphi = 28^\circ \text{ с помощью рис. 8.2 находим удельное}$$

активное напряжение сдвига от единичной нагрузки:  $\bar{\tau}_n = 0,015$  МПа.

Таким образом:  $T = 0,015 \cdot 0,8 = 0,012$  МПа.

Предельное активное напряжение сдвига  $T_{пр}$  в грунте рабочего слоя определяем по формуле (8.3). В ней где  $c_N = 0,003$  МПа;  $k_d = 4,5$  (см. табл. 8.1);

$z_{оп} = 7 + 10 + 18 + 28 = 63$  см;  $\varphi_{ст} = 34^\circ$ .

$$\gamma_{ср} = \frac{0,0024 \cdot 7 + 0,0023 \cdot 10 + 0,002 \cdot 18 + 0,002 \cdot 28}{63} = 0,002 \text{ кг/см}^3.$$

$T_{доп} = 0,003 \cdot 4,5 + 0,1 \cdot 0,002 \cdot 63 \cdot \text{tg } 34^\circ = 0,022$  МПа.

$$K_{пр} = \frac{T_{доп}}{T} = \frac{0,022}{0,012} = 1,83, \text{ что больше } K_{пр}^{тр} = 1,00.$$

Следовательно, конструкция удовлетворяет условию прочности по сдвигу в песчаном слое.

### Источники информации

1. ОДН 218.046-01 Отраслевые дорожные нормы. Проектирование нежестких дорожных одежд. – М, 2001. – 99 с.

2. Проектирование городских улиц и дорог: учебно-методическое пособие [Электронный ресурс] / сост. В.И. Жуков, С.В. Копылов; под ред. В.И. Жукова. – Электрон. дан. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 80 с.

3. СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуал. редакция СНиП 2.05.02-85\* / Мин-во регионального развития Российской Федерации. – М., 2013. – 139 с.

4. ГОСТ 9128-2013 Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. – М., ФГУП «Стандартинформ», 2014. – 54 с.

5. ГОСТ 25607-2009 Смеси щебёночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия.

6. ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ. Технические условия.

7. ГОСТ 32960-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчётные схемы нагружения / М.: ФГУП «Стандартинформ», 2016. – 8 с.

8. ГОСТ Р 27.002-2009 Надёжность в технике. Термины и определения.

9. Строительный справочник [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://spravidoc.ru/strojka/normativnaya-glubina-promerzaniya-grunta-dlya-gorodov-rossii.html>