

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

**КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЖЕСТКОЙ
ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ**

Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине
«Изыскания и проектирование автомобильных дорог» для студентов
специальности 270205 – Автомобильные дороги и аэродромы
и бакалавров по направлению 270800 – «Строительство»
профиля подготовки «Автомобильные дороги и аэродромы»

Белгород
2008

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова
Кафедра автомобильных дорог и аэродромов

Утверждено
научно-методическим советом
университета

**КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЖЕСТКОЙ
ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ**

Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине
«Изыскания и проектирование автомобильных дорог» для студентов
специальности 270205 – Автомобильные дороги и аэродромы
и бакалавров по направлению 270800 – «Строительство»
профиля подготовки «Автомобильные дороги и аэродромы»

Белгород
2008

УДК 625.8 (075)
ББК 39.311 я 7
К65

Составители: канд. техн. наук, проф. Н.Г. Горшкова
ст. преп. А.С. Погромский
Рецензент: канд. техн. наук, проф. В.И. Шухов

Конструирование и расчет жестких дорожных одежд: методические
К65 указания к выполнению курсовой работы / сост.: Н.Г. Горшкова,
А.С. Погромский. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. – 36 с.

В методических указаниях приводятся основные требования к структуре и содержанию раздела курсовой работы по расчету жесткой дорожной одежды по дисциплине «Изыскания и проектирование автомобильных дорог», приведен пример расчета.

Методические указания предназначены для студентов специальности 270205 – Автомобильные дороги и аэродромы.

УДК 625.72 (075)
ББК 39.311 я 7

© Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2008

Введение

К жестким дорожным одеждам относят цементобетонные и железобетонные покрытия и основания, которые хорошо сопротивляются растягивающим напряжениям, возникающим при их прогибах под нагрузкой от автомобилей. Жесткие дорожные одежды могут быть:

- цементобетонными монолитными на различных видах основания;
- асфальтобетонными на основаниях из цементобетона;
- сборными из предварительно напряженного железобетона, железобетона, армобетона на различных видах основания [1,2].

В соответствующем разделе курсовой работы студенты рассчитывают покрытие из монолитного цементобетона, материал основания дорожной одежды студенту задается в задании на проектирование. Методические указания предназначены для оказания помощи студентам при выполнении раздела курсовой работы по дисциплине «Изыскания и проектирование автомобильных дорог» в соответствии с новым нормативным документом «Методическими рекомендациями по проектированию жестких дорожных одежд» [1], (взамен ВСН 197–91).

1. Исходные данные

Основными исходными данными для расчета и конструирования жестких дорожных одежд являются:

- категория дороги;
- интенсивность и состав грузового движения;
- показатель роста интенсивности движения;
- район (область) проектирования автомобильной дороги;
- вид грунта земляного полотна.

Эта группа исходных данных содержится в задании на проектирование. Исходя из этого, определяются проектные параметры автомобильной дороги и условия работы дорожной одежды:

- ширина проезжей части (для дорог с разделительной полосой – ширина проезжей части для движения в одном направлении);
- ширина земляного полотна;
- дорожно-климатическая зона (рис.П.3.2 приложения 3 [1], приложение 1 [2]);
- глубина промерзания грунтов (рис. 4.4 [3]);
- глубина залегания грунтовых вод и схема увлажнения рабочего слоя земляного полотна (задается или устанавливается на основе анали-

за топографических данных по карте), а на основании этого определяется расчетная влажность грунта W_p .

Исходя из категории дороги и типа покрытия, устанавливается срок службы дорожной одежды, расчетная нагрузка на дорожную одежду (кН) и давление в шинах (МПа), класс бетона материала покрытия.

Для конструирования и расчета основания дорожной одежды необходимо, исходя из наличия местных и привозных дорожно-строительных материалов, выбрать материалы слоев основания, их физико-механические свойства и прочностные характеристики (коэффициент фильтрации дренирующего материала, модули упругости и др.).

2. Общие положения конструирования жестких дорожных одежд

В жестких дорожных одеждах различают следующие конструктивные слои [рис. 2.1]:

покрытие – верхняя часть одежды, воспринимающая усилия от колес автомобилей и подвергающаяся непосредственному воздействию атмосферных факторов;

основание – часть одежды, обеспечивающая совместно с покрытием перераспределение и снижение давления на нижележащие дополнительные слои или грунт земляного полотна;

дополнительные слои основания – слои между основанием и подстилающим грунтом, выполняющие морозозащитную, дренирующую и теплоизолирующую функции.

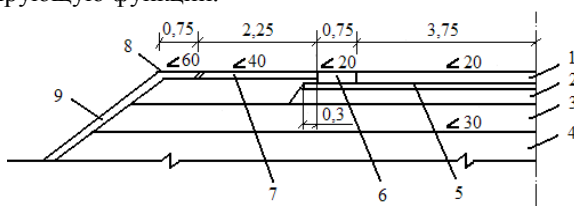


Рис. 2.1. Поперечный разрез типовой дорожной одежды с цементобетонным покрытием для дороги II категории:

- 1 – покрытие; 2 – основание; 3 – нижний слой основания; 4 – земляное полотно;
5 – выравнивающий слой; 6 – краевая укрепительная полоса;
7 – укрепленная часть обочины; 8 – неукрепленная часть обочины; 9 – откос

При необходимости между покрытием и основанием укладывают **выравнивающий слой** из обработанных вяжущими зернистых материалов (песка), который в качестве конструктивного слоя одежды не рас-

смачивается и в расчетах не учитывается. Выравнивающий слой предназначен для устранения неровностей основания и обеспечения возможности перемещения плит покрытия при изменении температуры. Если неровности основания не превышают 1 см, то допускается выравнивающий слой не устраивать, а применять только слой, прерывающий сцепление плит с основанием и служащий изолятором против высыхания бетона в раннем возрасте и появления усадочных трещин. Учитывая долговечность материала верхнего слоя покрытия, сроки службы для дорожных одежд с цементобетонным покрытием составляют: капитального типа – не менее 25 лет, облегченного типа – 20 лет, а для дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием на основании из бетона – не менее 20 лет.

Для исключения образования в слое песчаного основания колеи от автомобилей-самосвалов основание должно быть укреплено путем устройства слоя из щебня, шлака или гравия толщиной 10–12 см, причем только в местах пропуска автомобилей-самосвалов, подвозящих цементобетонную смесь. **Минимальная толщина основания** из бетона низкой прочности должна быть – 14 см; из нерудных материалов, укрепленных неорганическими вяжущими – 16 см; из щебня, шлака или гравия – 15 см.

Краевые укрепленные полосы устраивают из цемента- или асфальтобетона на бетонном основании, как правило, по типу основной дорожной одежды без устройства продольных швов. Для дорог низких категорий допускается краевые полосы устраивать из щебня. Ширина краевых полос на дорогах I–III категорий не менее 75 см, более низких категорий – не менее 50 см. Бетонные краевые полосы швами от покрытия не отделяются. При устройстве вместо краевых полос уширения шириной более 3 м последние отделяются от бетонного покрытия пазами с заполнением их по типу шва сжатия.

Цель конструирования жестких дорожных одежд заключается в выборе материалов, определении количества слоев и их размещении по глубине. При этом необходимо предусматривать максимальное использование местных строительных материалов, стремиться к уменьшению количества слоев, предусматривать проезд построечного транспорта по основанию, обеспечивать соответствие конструкции дорожной одежды технологии ее строительства, учитывать природно-климатические и гидрогеологические условия местности, предусматривать условия и возможность дальнейшего поэтапного усиления, уширения и повышения капитальности автомобильной дороги.

3. Конструкция монолитных цементобетонных покрытий

Толщина бетонных покрытий должна быть одинакова по всей ширине проезжей части, однако на 6-полосных покрытиях толщину крайних внешних полос допускается увеличивать на 2 см для обеспечения проезда тяжелых автомобилей. Бетонные покрытия чаще всего бывают однослойными, реже – двухслойными, устраиваемыми методом срачивания слоев с одновременным уплотнением верхнего и нижнего слоев, с толщиной верхнего слоя не менее 6 см. Толщину бетонных покрытий h определяют расчетом. Минимальную толщину определяют из табл. 3.1 [1, табл. 2.1; 2, табл. 4.1].

Таблица 3.1

Минимальная толщина монолитных цементобетонных покрытий

Основание	Минимальная толщина, см, покрытия при интенсивности движения расчетной нагрузки, ед/сут. на полосу				
	более 2000	1000–2000	500–1000	100–500	менее 100**
Бетонное (мелкозернистый бетон, шлакобетон)	22	20	18(16)	18*(16)	15*
Из материалов, укрепленных неорганическими вяжущими	22	20	18(16)	18*(16)	15*
Из щебня, гравия, шлака	–	22	20(18)	18*(16)	16*
Из песка, песчано-гравийной смеси	–	–	20(18)	18*(16)	16

* Толщина основания в этих случаях может быть на 2 см меньше указанных минимальных толщин.

** Сооружаются при соответствующем технико-экономическом обосновании.

Примечания: 1. В скобках приведена толщина покрытия для облегченных условий движения.

2. Если в поперечных швах штыри не применяются, толщину покрытия увеличивают на 2 см.

В покрытии устраивают *продольные и поперечные швы (сжатия и расширения)*, делящие покрытие на плиты определенной длины и ширины. В конце рабочей смены или при длительных перерывах в бетонировании (более 2–4 часов) устраивают рабочие швы по типу швов сжатия и при необходимости швы расширения. Швы сжатия устраивают для предохранения покрытия от трещинообразования в свежееуложенном бетоне. В швах предусматривают штыревые соединения. Пазы швов заполняют герметизирующим материалом. Длину плит $l_{сж}$ (расстояние между поперечными швами сжатия) определяют расчетом, но не более $25h$; на земляном полотне с ожидаемыми неравномерными осадками (включая насыпи высотой более 3 м) – $22h$; а в местах перехода из выемок в высокие насыпи, в местах примыкания к искусственным сооружениям и в покрытиях 6 м и менее – $20h$. Продольные швы предусматривают при ширине покрытия более $23h$. Контрольные швы, по конструкции аналогичные швам сжатия, обеспечивающие температурно-усадочную трещиностойкость в раннем возрасте, устраивают через каждые 2–3 плиты.

Штыри в продольных и поперечных швах располагают в соответствии с рис. 3.1. Конструкции швов сжатия и расширения принимают по рис. 3.1 и 3.2. *Швы сжатия в свежееуложенном цементобетонном покрытии назначают, чтобы исключить усадку бетона при твердении. Швы расширения в цементобетонных покрытиях назначают, чтобы исключить расширение бетона при нагревании.*

Паз швов сжатия может быть в сечении прямоугольным, ступенчатым или с наклонными стенками. Ширина паза швов сжатия может быть от 4 до 15 мм, глубина паза – не менее $0,25h$. Ширину паза над швом расширения принимают равной 33–35 мм.

При устройстве покрытий на цементогрунтовом основании толщиной не менее 18 см бетоноукладчиками со скользящими формами и допущении проектной организацией уступов между плитами в поперечных швах высотой 3 мм допускается в поперечных швах штыри не применять. Толщину покрытия в этом случае увеличивают на 2 см, а швы расширения при температуре бетонирования более 10°C допускается не устраивать (п. 2.11 [5]). При устройстве швов не допускается отклонения перекосов и наклонов штырей от проектного положения более чем на 1 см, длина зоны обмазки штырей в поперечных швах разжиженным битумом составляет $2/3$ длины штырей, толщина обмазки не должна превышать 0,3 мм. Температурные колпачки, надеваемые на штыри швов расширения, должны обеспечивать свободное смещение штыря в

бетоне не менее чем на 2 см. Штыри в продольных швах устанавливают без битумной обмазки, с допущением перекосов не более чем на 5 см.

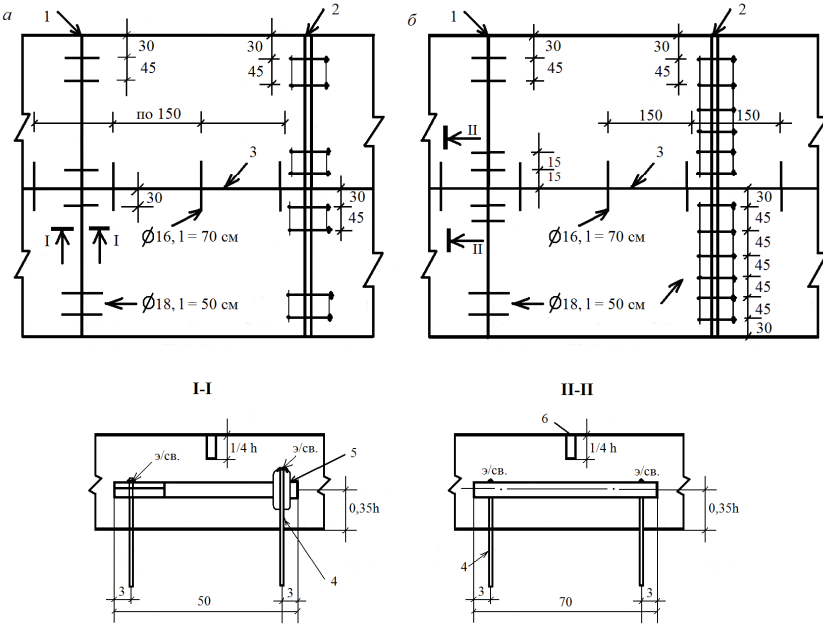


Рис. 3.1. Расположение штырей в швах покрытий на цементогрунтовом и цементобетонном (а), щебеночном и песчаном (б) основаниях: 1 – шов сжатия; 2 – шов расширения; 3 – продольный шов; 4 – установочные шпильки, приваренные к штырям; 5 – изоляция места сварки с помощью специальных колпачков или полиэтиленовой пленки; 6 – наполнитель

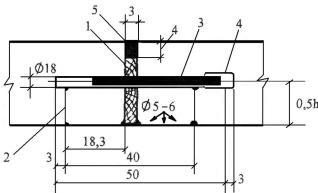


Рис.3.2. Конструкция шва расширения: 1 – прокладка из выдержанной в воде древесины; 2 – каркас для фиксации прокладки и штырей, свариваемый в кондукторе; 3 – штыри в битумной изоляции, привязываемые к каркасу; 4 – температурный компенсатор (колпачок); 5 – наполнитель (герметик)

Перед мостами и путепроводами устраивают не менее трех швов расширения без штырей и прокладок, шириной по 6 см каждый, через 15–30 м друг от друга (так называемые *швы коробления*). Швы заполняют сильно сжимаемым материалом, например песком, обработанным битумом, вверху шва устанавливают резиновую прокладку высотой 6 см. Возможно армирование плит (арматурой) по индивидуальным проектам под тяжелые нагрузки.

4. Расчет монолитных цементобетонных покрытий

Общие положения

Расчет дорожной одежды выполняют по предельным состояниям, определяющим потерю работоспособности того или иного элемента конструкции. ***Жесткие дорожные одежды рассчитывают как плиту на упругом основании.***

Расчет ведется путем проверок предварительно назначенной конструкции по следующим критериям:

- по прочности верхних слоев дорожной одежды;
- по прочности и устойчивости земляного полотна и слоев основания на сдвиг и по накоплению уступов в поперечных швах покрытия;
- по устойчивости в продольном направлении покрытия в жаркое время года;
- по прочности стыковых и монтажных соединений;
- по устойчивости дорожной одежды к воздействию морозного пучения;
- по способности дренарующего слоя основания отводить влагу в весенний период.

В результате расчета определяют толщину покрытия и слоев основания, расстояние между поперечными швами, количество штырей в швах расширения и сжатия.

Жесткие дорожные одежды рассчитывают с учетом требуемого уровня надежности k_n (вероятности безотказной работы конструкции в течение срока эксплуатации) и соответствующего ему коэффициента прочности k_{np} , принимаемых по табл. 4.1.

Уровень надежности и коэффициент прочности

Интенсивность расчетной нагрузки, ед/сут	Уровень надежности k_n	Коэффициент прочности $k_{пр}$
Более 1000	0,95	1,00
500–1000	0,90	0,94
Менее 500	0,80	0,87

Расчетные параметры подвижной нагрузки

В зависимости от вида расчета конструкции используют различные характеристики, отражающие интенсивность воздействия на нее подвижной нагрузки:

N – перспективную (на конец срока службы) общую среднесуточную интенсивность движения;

N_p – приведенное к расчетной нагрузке среднесуточное (на конец срока службы) число проездов всех колес, расположенных по одному борту расчетного автомобиля, в пределах одной полосы проезжей части (приведенная интенсивность воздействия нагрузки);

$\sum N_p$ – суммарное расчетное число приложения приведенной расчетной нагрузки к расчетной точке на поверхности конструкции за срок службы.

Как правило, в задании на проектирование задается перспективная (на 20-й год эксплуатации) интенсивность грузового движения транспортных средств. Срок службы монолитного цементобетонного покрытия составляет 25 лет. Поэтому необходимо определить интенсивность движения на последний год (25-й год) срока службы по формуле

$$N_{25} = N_{20}q^5, \quad (4.1)$$

где N_{20} – перспективная интенсивность грузового движения, авт/сут;

q – показатель ежегодного прироста интенсивности движения

(задается).

За расчетный принимается автомобиль с предельной нагрузкой на ось из заданного состава движения, доля которого составляет не менее 10 %. Смешанный транспортный поток приводится к расчетному автомобилю на последний год срока службы по формуле

$$N_p = f_{\text{пол}} \sum_{m=1}^n N_m S_{m\text{сум}}, \quad (4.2)$$

где $f_{\text{пол}}$ – коэффициент, учитывающий число полос движения и распределение движения по ним, определяемый по табл. 4.2;

n – общее число различных марок транспортных средств в составе транспортного потока;

N_m – число проездов в сутки в обоих направлениях транспортных средств m -й марки (задается);

$S_{m\text{сум}}$ – суммарный коэффициент приведения воздействия на дорожную одежду транспортного средства m -й марки к расчетной нагрузке $Q_{\text{расч}}$, определяемый по табл. 4.3.

Таблица 4.2

Коэффициент, учитывающий число полос движения

Число полос движения	Значение коэффициента $f_{\text{пол}}$ для полосы с номером от обочины		
	1	2	3
1	1,00	–	–
2	0,55	–	–
3	0,50	0,50	–
4	0,35	0,20	–
6	0,30	0,20	0,05

Примечания. 1. Порядковый номер полосы считается справа по ходу движения в одном направлении.

2. Для расчета обочин принимают $f_{\text{пол}} = 0,01$.

Таблица 4.3

Суммарный коэффициент приведения воздействия на дорожную одежду

Типы автомобилей	Коэффициент приведения к расчетной нагрузке $S_{m\text{сум}}$
Легкие грузовые автомобили грузоподъемностью от 1 до 2 т	0,005
Средние грузовые автомобили грузоподъемностью от 2 до 5 т	0,2
Тяжелые грузовые автомобили грузоподъемностью от 5 до 8 т	0,7
Очень тяжелые грузовые автомобили грузоподъемностью более 8 т	1,25
Автобусы	0,7
Тягачи с прицепами	1,5

Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки к точке на поверхности конструкции за срок службы определяют по формуле

$$\sum N_p = 0,7N_p \frac{K_c}{q^{(T_{\text{сл}}-1)}} T_{\text{раг}} k_n, \quad (4.3)$$

где N_p – приведенная интенсивность на последний год срока службы, авт/сут;

$T_{\text{раг}}$ – расчетное число расчетных дней в году, соответствующих определенному состоянию деформируемости конструкции (принимается из прил. 6 [1] или прил. 4 [2]);

k_n – коэффициент, учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого (табл. 4.4);

K_c – коэффициент суммирования, определяемый по формуле

$$K_c = \frac{q^{T_{\text{сл}}} - 1}{q - 1}, \quad (4.4)$$

где $T_{\text{сл}}$ – расчетный срок службы;

q – показатель изменения интенсивности движения данного типа автомобиля по годам (задается).

Таблица 4.4

Коэффициент, учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого

Тип дорожной одежды	Значение коэффициента k_n при различных категориях дорог				
	I	II	III	IV	V
Капитальный	1,49	1,49	1,38	1,31	–

Требуемый уровень надежности K_n и соответствующий коэффициент прочности $K_{\text{пр}}$ определяется в зависимости от интенсивности по табл. 4.1 методических указаний.

4.3. Определение расчетных характеристик материалов конструктивных слоев дорожной одежды и грунта земляного полотна

Расчетную влажность грунта рабочего слоя определяют по формуле

$$W = \bar{W}_{\text{таб}} (1 + 0,1t), \quad (4.5)$$

где $\bar{W}_{\text{таб}}$ – среднее многолетнее значение относительной влажности грунта, наблюдавшееся в наиболее неблагоприятный (весенний) период года в рабочем слое земляного полотна в зависимости от дорожно-климатической зоны и подзоны, схемы увлажнения земляного полотна (табл. П.3.1 [1]);

t – коэффициент нормированного отклонения, принимаемый в зависимости от K_n по табл. 4.5 (табл. П.4.2 [3]).

Таблица 4.5

Коэффициент нормированного отклонения

K_n	0,85	0,90	0,95	0,98
t	1,06	1,32	1,71	2,19

Для этой расчетной влажности принимают необходимые расчетные характеристики подстилающего грунта, пользуясь прил. 3 [1] или прил. 2 [2], и материалов дорожной одежды, пользуясь прил. 4 [1] или прил. 3 [2]. При определении характеристик грунта по прил. 3 (табл. П.3.4) необходимо определить характеристики сопротивления сдвигу: сцепление C , МПа; статический угол внутреннего трения $\varphi_{\text{стат}}$, град.; динамический угол внутреннего трения $\varphi_{\text{дин}}$, град. По найденному значению статического угла внутреннего трения определяют безразмерные коэффициенты, учитывающие сопротивление грунта сдвигу A_1 , A_2 и A_3 по табл. 3.5 [1]. Коэффициенты виброползучести $K_{\text{д}}^{\text{о}}$ материалов основания определяют по табл.3.6 [1].

4.4. Определение эквивалентного модуля упругости основания

Эквивалентный модуль упругости основания дорожной одежды необходимо знать, чтобы найти упругую характеристику плиты. Эквивалентный модуль упругости основания определяют путем последовательного приведения слоистой системы к двухслойной по формуле

$$E_o^3 = \frac{E_i}{0,713 \sqrt{\frac{E_{\text{общ}}^{i+1}}{E_i}} \cdot \arctg\left(\frac{1,35h_3}{D}\right) + \frac{E_i}{E_{\text{общ}}^{i+1}} \cdot \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{D}{h_3}\right)}, \quad (4.6)$$

где E_i – модуль упругости материала i -го слоя, МПа;

$E_{\text{общ}}^{i+1}$ – общий модуль полупространства, подстилающего i -й слой, МПа;

D – диаметр отпечатка колеса, $D = 50$ см;

h_3 – эквивалентная толщина определяется по формуле

$$h_3 = 2h_i \cdot \sqrt[3]{\frac{E_i}{6E_{\text{общ}}^{i+1}}} . \quad (4.7)$$

4.5. Определение расчетной прочности бетона

Расчетное сопротивление бетона на растяжение при изгибе определяют по формуле

$$R_{\text{рн}}^{\text{расч}} = B_{\text{тб}} K_{\text{нп}} K_y K_F , \quad (4.8)$$

где $B_{\text{тб}}$ – класс бетона на растяжение при изгибе, принимается по табл. 4.6 (табл. П.1.1 прил. 1[1]);

$K_{\text{нп}}$ – коэффициент набора прочности со временем (для бетона естественного твердения для районов с умеренным климатом $K_{\text{нп}} = 1,2$);

K_F – коэффициент, учитывающий воздействие попеременного замораживания-оттаивания, равный 0,95;

K_y – коэффициент усталости бетона при повторном нагружении, определяемый по формуле

$$K_y = 1,08 (\sum N_p)^{-0,063} . \quad (4.9)$$

Таблица 4.6

Класс бетона для различных видов дорожных одежд

Конструктивный слой дорожной одежды	Категория автомобильной дороги	Интенсивность расчетной нагрузки, ед/сут	Минимальные проектные классы (марки) по прочности	
			на растяжение при изгибе $B_{\text{тб}} (P_{\text{тб}})$	на сжатие $B(M)$
Монолитное однослойное покрытие или верхний слой двухслойного покрытия	I	Более 2000	4,4(55)	35 (450)
	II, III	От 1000 до 2000	4,0(50)	30(400)
	IV	Менее 1000	3,6(45)	25(300)
Нижний слой двухслойных монолитных покрытий	I – II	Более 1000	3,2(40)	–
	III – IV	Менее 1000	2,8(35)	–

4.6. Определение толщины покрытия

Величину расчетной нагрузки, кН, вычисляют по формуле

$$P = P_k m_g, \quad (4.10)$$

где P_k – нормативная нагрузка на колесо, равная 50 кН;

m_g – коэффициент динамичности, равный 1,3.

Радиус отпечатка колеса, см

$$R = \sqrt{\frac{P}{0,1 \cdot p_{\text{ш}} \pi}}, \quad (4.11)$$

где $p_{\text{ш}}$ – давление в шинах, принимаемое равным 0,6 МПа.

Для нескольких значений толщины покрытия h определяют:

1) **упругую характеристику плиты**, см

$$l_y = h_3 \sqrt{\frac{E_6 (1 - \mu_0^2)}{6E_3 (1 - \mu_6^2)}}, \quad (4.12)$$

где E_6 – модуль упругости цементобетона, МПа;

E_3 – эквивалентный модуль упругости на поверхности основания, МПа;

μ_6 – коэффициент поперечной деформации бетона (коэффициент Пуассона) принимается равным 0,2 для тяжелого и мелкозернистого бетона;

μ_0 – коэффициент Пуассона основания;

2) **напряжения растяжения при изгибе**, возникающие в бетонном покрытии от действия нагрузки, с учетом перепада температуры по толщине плиты, МПа

$$\sigma_{pi} = \frac{60 K_M K_{\text{усл}} K_{\text{шт}} P}{h^2 K_t} \left(0,0592 - 0,2137 \lg \frac{R}{l_y} \right), \quad (4.13)$$

где K_M – коэффициент, учитывающий влияние места расположения нагрузки для неармированных покрытий $K_M = 1,5$;

$K_{\text{усл}}$ – коэффициент, учитывающий условия работы $K_{\text{усл}} = 0,66$;

$K_{\text{шт}}$ – коэффициент, учитывающий влияние стыковых соединений на условия контактирования плит с основанием (при наличии в поперечных швах стыков $K_{\text{шт}} = 1,0$);

K_t – коэффициент, учитывающий влияние температурного коробления плит, определяемый по табл.3.4 [1] или табл. 4.3 [2];

3) **коэффициент усталости бетона** при повторном нагружении

$$K_y = \frac{\sigma_{pt} K_{np}}{K_{нп} B_{ib} K_F}. \quad (4.14)$$

По полученным результатам вычислений строят график зависимости $K_y = f(h)$ и принимают толщину покрытия.

4.7. Расчет по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев

Дорожную одежду проектируют из расчета, чтобы под действием кратковременных или длительных нагрузок в подстилающем грунте или малосвязных (песчаных) слоях за весь срок службы не накапливались недопустимые остаточные деформации формоизменения. Расчет по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев производят согласно ОДН 218.046–01 [3], но с учетом того, что расчетный модуль упругости бетонного покрытия назначают по табл. 4.7.

Таблица 4. 7

Модуль упругости бетона

Класс бетона на растяжение при изгибе		B_{ib} 4,4	B_{ib} 4,0	B_{ib} 3,6	B_{ib} 3,2	B_{ib} 2,8	B_{ib} 2,4
Модуль упругости, МПа	тяжелый бетон	1770	1650	1600	1520	1420	1310
	мелкозернистый бетон	1400	1300	1250	1150	1100	1000

4.8. Расчет основания

Критерием устойчивости основания является устойчивость его по сдвигу и отсутствие недопустимых деформаций под торцами плит к концу расчетного срока службы. Для дорог I–III категорий высота уступов между плитами в поперечных швах не должна превышать 3 мм. Устойчивость считают обеспеченной при условии $q_{расч} \leq q_{доп}$, где $q_{расч}$ – расчетное давление на основание в МПа, а $q_{доп}$ – допустимое давление на основание.

Чтобы проверить данное условие необходимо рассчитать полудлину и полуширину отпечатка следа колеса, отнесенного к нейтральной оси плиты, см

$$a = 0,87R + 0,5h; \quad (4.15)$$

$$b = 1,15R + 0,5h + 0,5b', \quad (4.16)$$

где R – радиус отпечатка колеса, см;

h – толщина покрытия, см;

b' – расстояние между отпечатками колес для двухколесной опоры (принимается равным 12,22 см).

Расчетная длина и ширина эпюр отпора основания в случае приложения нагрузки:

– в центральной части плиты

$$L_x^u = 2,5l_y^x + a; \quad (4.17)$$

$$L_y^u = 2,5l_x^y + b, \quad (4.18)$$

где $l_y^x = l_x^y = l_y$ – упругая характеристика плиты, см;

– на торце и на углу с обратным выгибом

$$L_x^T = 0,7L_x^u; \quad (4.19)$$

$$L_y^T = 0,7L_y^u. \quad (4.20)$$

Значения L_x^T и L_y^T не должны превышать, соответственно, $2A$ и $2B$ (A – полудлина плиты, см; B – полуширина плиты, см). Тогда расчетное давление на основание при нагружении обоих углов плиты у поперечного шва, МПа

$$q_{\text{расч}} = \frac{27,4 \cdot P \cdot m_{\text{ст}}}{L_x^T \cdot L_y^T}, \quad (4.21)$$

Если под плитой основание толщиной h_0 укрепленное, то проверку на сдвиг проводят на глубине h_0 , а L_x^T и L_y^T увеличивают на $3h_0$. Тогда расчетное давление на основание при нагружении обоих углов плиты у поперечного шва, МПа

$$q_{\text{расч}} = \frac{27,4 \cdot P \cdot m_{\text{ст}}}{(L_x^T + 3h_0)(L_y^T + 3h_0)}, \quad (4.22)$$

где $m_{\text{ст}}$ – коэффициент, учитывающий влияние стыкового соединения, если стык работает, то $m_{\text{ст}} = 0,7$, если нет, то $m_{\text{ст}} = 1,0$.

Коэффициенты, учитывающие размеры площадки нагружения, определяют

$$n_j = 1 - \frac{0,25L_y^T}{L_x^T}; \quad (4.23)$$

$$n_q = 1 + \frac{1,5L_y^T}{L_x^T}; \quad (4.24)$$

$$n_c = 1 + \frac{0,3L_y^T}{L_x^T}. \quad (4.25)$$

Допустимое давление на основание, МПа

$$q_{\text{доп}} = \frac{m}{100K_n} [n_j A_1 L_y^T \gamma_{\text{гр}} + n_q A_2 (h + h_o + h_{\text{вс}}) \gamma_{\text{гр}} + n_c A_3 C], \quad (4.26)$$

где m – коэффициент, учитывающий условия работы ($m = 1,3$);

K_n – коэффициент надежности ($K_n = 1,1$);

A_1, A_2, A_3 – безразмерные коэффициенты, зависящие от угла внутреннего трения грунта, приведенные в табл. 4.8 (табл. 3.5 [1]);

$\gamma_{\text{гр}}$ – удельный вес грунта, т/м³;

$h_{\text{вс}}$ – толщина выравнивающего слоя, м;

C – удельное сцепление грунта основания, МПа.

Таблица 4.8

Коэффициенты, зависящие от угла внутреннего трения грунта

Угол внутреннего трения грунта φ , град.	Безразмерные коэффициенты		
	A_1	A_2	A_3
4	0,06	1,25	3,51
8	0,10	1,39	3,71
10	0,18	1,73	4,17
24	0,72	3,87	6,45
26	0,84	4,37	6,90
28	0,98	4,93	7,40
30	1,15	5,59	7,95
32	1,34	6,35	8,55
34	1,55	7,21	9,21
36	1,81	8,25	9,98
38	2,11	9,44	10,80
40	2,46	10,84	11,74

Высоту накапливаемых уступов между плитами, см, определяют

$$\omega_{\text{уст}} = \frac{8,5PK_o m_{\text{ст}}}{E_o L_y^T} (1 + K_q \lg(\sum N_p)), \quad (4.27)$$

где K_0 – коэффициент, учитывающий влияние виброползучести при динамическом нагружении подвижной колесной нагрузкой (табл. 4.9 или табл.3.6 [1]);

K_q – коэффициент, учитывающий влияние нагруженности основания по сдвигу:

$$K_q = \frac{q_{\text{расч}} - 0,15q_{\text{доп}}}{q_{\text{доп}}}. \quad (4.28)$$

Таблица 4.9

Коэффициент, учитывающий влияние виброползучести K_0

Основание	Толщина основания, см	Материал выравнивающего слоя	Значение K_0 , когда стыки	
			не работают	работают
Песчаное		Песок СНМ Подшовные подкладки	5,7**	1,6**
			2–3*/**	1,3**
			2–3*	1,2–1,5*
Песчаногравийное	20	Песок	2,0	1,2
	20	Цементопесчаная смесь	1,2	1,0
Цементогрунтовое	16	Песок	1,5	1,1
	16	Цементопесчаная смесь	1,1	1,0
Нефтегрунтовое	20	Нефтегрунт	2,2	1,3
	20	СНМ	1,8	1,2
Нефтецементогрунтовое	20	Нефтегрунт	1,2	1,1
Грунтовое с добавкой отработанных буровых растворов	20	СНМ	1,1	1,0

* Меньшее значение – для более сухого грунта земляного полотна, уплотненно-го в летнее время.

** Для песчаных оснований из однозернистых песков значение при отсутствии стыков увеличивают в 1,3 раза, а при наличии – в 2 раза.

Диаметр штырей в швах вычисляют по формуле, мм

$$d_{\text{шт}} = \sqrt{\frac{10P_{\text{шт}}}{A_d R_u n K_d}}, \quad (4.29)$$

где A_d – коэффициент длины зоны обжатия бетона в месте входа в него штыря (для швов сжатия $A_d = 3$, для швов расширения $A_d = 1,5$);

R_u – средняя прочность бетона на сжатие, МПа (допускается принимать $R_u \approx 8B_{tb}$);

n – количество штырей на полосе наката или на длине l_y ;

K_d – коэффициент запаса, равный 0,75;

$P_{шт}$ – часть расчетной нагрузки на колесо, воспринимаемой штыревым соединением, определяется

$$P_{шт} = 0,9P \left(1 - \frac{\omega_{шт}}{\omega_{пл}} \right), \quad (4.30)$$

где $\omega_{шт}$ – податливость штырей при нагружении, мм (для швов сжатия $\omega_{шт} = 1,5$ мм, для швов расширения $\omega_{шт} = 2,0$ мм);

$\omega_{пл}$ – расчетный прогиб края плиты от действия нагрузки, мм (для цементогрунтового основания $\omega_{пл} = 3$ мм).

4.9. Проверка конструкции дорожной одежды на морозостойчивость и дренажную способность

Расчет морозозащитных слоев основания проводят в соответствии с положениями ОДН 218.046–01 «Проектирование нежестких дорожных одежд» [3] исходя из допустимой для монолитных цементобетонных покрытий величины морозного пучения 3 см.

Проектирование устройств по осушению дорожных одежд и земляного полотна, включая расчет дренарующего слоя, проводят также согласно ОДН 218.046–01 «Проектирование нежестких дорожных одежд» [3]. Ориентировочно толщину дренарующего слоя, м, можно определить по формуле

$$h_\phi = 0,1 \left(1 + \frac{L_\phi}{K_\phi} \right) \quad (4.31)$$

где L_ϕ – длина участка фильтрации, равная половине ширины земляного полотна, м;

K_ϕ – коэффициент фильтрации дренарующего материала, м/сут (для песка крупнозернистого $K_\phi = 5–7$ м/сут; для песка среднезернистого $K_\phi = 2,5–3,5$ м/сут).

5. Пример расчета жесткой дорожной одежды

Требуется запроектировать дорожную одежду для следующих исходных данных:

- дорога располагается во II дорожно-климатической зоне в 3-й подзоне, в Псковской области;
- категория автомобильной дороги – II;
- ширина проезжей части для движения в одном направлении – 3,75 м;
- ширина земляного полотна – 15 м;
- расчетный срок службы покрытия – 25 лет;
- нормативная нагрузка на дорожную одежду – 50 кН;
- перспективная интенсивность грузового движения – 3580 авт/сут;
- состав грузового потока:

ГАЗ-53	30 %
ЗИЛ-130	30 %
МАЗ-500А	35 %
автобус ЛАЗ-695М	3 %
автобус ЛиАЗ-677	2 %

- показатель ежегодного прироста интенсивности движения – 1,05;
- тип местности по условию увлажнения – 3;
- грунт земляного полотна – суглинок тяжелый пылеватый;
- глубина промерзания – 1,52 м;
- глубина залегания грунтовых вод – 2,4 м;
- коэффициент фильтрации дренирующего слоя (песка) – 5 м/сут;
- материал покрытия – монолитный цементобетон класса $B_{fb} = 4,0$ МПа;
- материал основания – щебеночно-гравийно-песчаная смесь неоптимального состава, укрепленная цементом М100;
- дополнительный слой основания – песок крупный;
- требуемая плотность грунта – 1,66 г/см³.

5.1. Установка расчетных параметров подвижной нагрузки

Определим интенсивность грузового движения на последний год срока службы

$$N_{25} = N_{20} q^5, \quad (5.1)$$

где N_{20} – перспективная интенсивность грузового движения, авт/сут;

q – показатель прироста интенсивности движения.

$$N_{25} = 3580 \cdot 1,05^5 = 4570 \text{ авт/сут.}$$

Находим расчетную приведенную интенсивность на последний год срока службы по известной формуле

$$N_p = f_{\text{пол}} \sum_{m=1}^n N_m S_{m\text{сум}} \quad (5.2)$$

$$N_p = 0,55 \cdot 4570(0,3 \cdot 0,2 + 0,3 \cdot 0,2 + 0,35 \cdot 0,7 + 0,03 \cdot 0,7 + 0,02 \cdot 0,7) = 1006 \text{ авт/сут.}$$

Рассчитываем суммарное расчетное число приложений нагрузки за срок службы дорожной одежды, предварительно определив коэффициент суммирования

$$K_c = \frac{1,05^{25} - 1}{1,05 - 1} = 47,73$$

Значение $T_{\text{рдг}}$ принимаем из табл. П.6.1[1] и по рис. П.6.1[1], $T_{\text{рдг}} = 125$ расчетных дней. Значение коэффициента k_n принимаем по табл. 4.4, $k_n = 1,49$.

$$\sum N_p = 0,7 \cdot 1006 \frac{47,73}{1,05^{(25-1)}} 125 \cdot 1,49 = 1941068 \text{ авт/сут.}$$

Требуемый уровень надежности K_n и соответствующий коэффициент прочности $K_{\text{пр}}$ определим в зависимости от интенсивности по табл.4.1: $K_{\text{пр}} = 0,94$ при уровне надежности $K_n = 0,90$.

5.2. Определение расчетных характеристик материалов конструктивных слоев дорожной одежды и грунта земляного полотна

Определим расчетную влажность грунта рабочего слоя

$$W = \bar{W}_{\text{таб}} (1 + 0,1t), \quad (5.3)$$

где $\bar{W}_{\text{таб}}$ – среднее многолетнее значение относительной влажности грунта, наблюдавшееся в наиболее неблагоприятный (весенний) период года в рабочем слое земляного полотна в зависимости от дорожно-климатической зоны и подзоны, схемы увлажнения земляного полотна (табл. П.3.1 [1]);

t – коэффициент нормированного отклонения, принимаемый в зависимости от K_n по табл. 4.5.

$$W = 0,78(1 + 0,1 \cdot 1,32) = 0,88$$

Определим коэффициенты, учитывающие сопротивление грунта сдвигу (табл.4.8): для суглинка тяжелого пылеватого $A_1 = 0,25$; $A_2 = 1,99$; $A_3 = 4,46$.

Характеристики материалов основания и грунта рабочего слоя приведены в виде таблицы:

Материал слоя	Модуль упругости, МПа	Характеристики сопротивления сдвигу		
		C , МПа	$\varphi_{\text{стат.}}$, °	$\varphi_{\text{дин.}}$, °
ЩГПС, укрепленная цементом М100	950	–	–	–
Песок крупный	130	0,003	35	29
Суглинок тяжелый пылеватый	26,4	0,0012	11,8	2,1

Найдем коэффициенты виброползучести K_δ материалов основания (табл.4.9):

Материал слоя основания	Толщина основания, h_o , м	Значение K_δ , когда стыки	
		не работают	работают
ЩГПС, укрепленная цементом М100	0,16	1,5	1,1
Песок крупный	–	5,7	1,6

Определим характеристики материала покрытия:

Материал покрытия	Растяжение при изгибе, B_{ib}	Начальный модуль упругости E_δ , МПа	Модуль упругости для расчета на сдвиг $E_{\text{расч}}$, МПа
Цементобетон	4,0	33000	1650

5.3. Определение необходимой толщины дренирующего слоя

Толщину дренирующего слоя определяют по формуле

$$h_\phi = 0,1 \left(1 + \frac{L_\phi}{K_\phi} \right), \quad (5.4)$$

где L_ϕ – длина участка фильтрации, равная половине ширины земляного полотна, м;

K_ϕ – коэффициент фильтрации дренирующего материала, м/сут.

В нашем случае $L_\phi = 7,5\text{м}$; $K_\phi = 5\text{м/сут}$.

$$h_{\phi} = 0,1 \left(1 + \frac{7,5}{5} \right) = 0,25 \text{ м}$$

Таким образом, принимаем толщину дренирующего слоя 25 см.

5.4. Назначение конструкции дорожной одежды:

1) покрытие – монолитный цементобетон класса $B_{fb} 4,0$; минимальная толщина $h = 18$ см;

2) основание – ЩГПС неоптимального состава, укрепленная цементом М100 толщиной $h_0 = 16$ см;

3) нижний слой основания – песок крупный толщиной $h_n = 25$ см.

Конструкции швов принимаем в соответствии с рис.2.2. Длина плит не менее $l_{сж} = 25h = 25 \cdot 0,18 = 4,5$ м.

5.5. Определение эквивалентного модуля упругости основания

1. На уровне дренирующего слоя песка:

Эквивалентная толщина песчаного слоя, см

$$h'_3 = 2h_n \sqrt[3]{\frac{E_n}{6E_{гп}}}, \quad (5.5)$$

где h_n – толщина слоя песка, см;

E_n – модуль упругости песчаного слоя, МПа;

$E_{гп}$ – общий модуль упругости грунта земляного полотна, МПа;

D – диаметр отпечатка колеса, $D = 50$ см.

$$h'_3 = 2 \cdot 25 \sqrt[3]{\frac{130}{6 \cdot 26,4}} = 46,81 \text{ см}$$

Эквивалентный модуль упругости на поверхности дренирующего слоя, МПа

$$E'_3 = \frac{E_n}{0,71 \sqrt[3]{\frac{E_{гп}}{E_n}} \cdot \arctg\left(\frac{1,35h'_3}{D}\right) + \frac{E_n}{E_{гп}} \cdot \frac{2}{\pi} \arctg\left(\frac{D}{h'_3}\right)}, \quad (5.6)$$

$$E'_3 = \frac{130}{0,71 \sqrt[3]{\frac{26,4}{130}} \cdot \arctg\left(\frac{1,35 \cdot 46,81}{50}\right) + \frac{130}{26,4} \cdot \frac{2}{3,14} \arctg\left(\frac{50}{46,81}\right)} = 44,17 \text{ МПа}$$

2. На уровне слоя основания из ЩГПС, укрепленной цементом М100:

Эквивалентная толщина слоя

$$h_3'' = 2 \cdot 16 \cdot \sqrt[3]{\frac{950}{6 \cdot 44,17}} = 48,97 \text{ см}$$

Эквивалентный модуль упругости на поверхности основания

$$E_3'' = \frac{950}{0,71 \sqrt[3]{\frac{44,17}{950}} \cdot \arctg\left(\frac{1,35 \cdot 48,97}{50}\right) + \frac{950}{44,17} \cdot \frac{2}{3,14} \arctg\left(\frac{50}{48,97}\right)} = 85,29 \text{ МПа}$$

5.6. Определение расчетной прочности бетона

Расчетное сопротивление бетона на растяжение при изгибе определяют по формуле

$$R_{\text{пр}}^{\text{расч}} = B_{\text{иб}} K_{\text{нп}} K_y K_F, \quad (5.7)$$

где $B_{\text{иб}}$ – класс бетона на растяжение при изгибе;

$K_{\text{нп}}$ – коэффициент набора прочности со временем (для бетона естественного твердения для районов с умеренным климатом $K_{\text{нп}} = 1,2$);

K_F – коэффициент, учитывающий воздействие попеременного замораживания-оттаивания, равный 0,95;

K_y – коэффициент усталости бетона при повторном нагружении, определяемый по формуле

$$K_y = 1,08 \left(\sum N_p \right)^{-0,063}; \quad (5.8)$$

$$K_y = 1,08 (1941068)^{-0,063} = 0,43;$$

$$R_{\text{пр}}^{\text{расч}} = 4,0 \cdot 1,2 \cdot 0,43 \cdot 0,95 = 1,96 \text{ МПа.}$$

5.7. Определение толщины покрытия

Вычислим величину расчетной нагрузки, кН

$$P = P_k m_g, \quad (5.9)$$

где P_k – нормативная нагрузка на колесо, кН;

m_g – коэффициент динамичности, равный 1,3.

$$P = 50 \cdot 1,3 = 65 \text{ кН}$$

Найдем радиус отпечатка колеса, см

$$R = \sqrt{\frac{P}{0,1 \cdot p_{\text{ш}} \pi}}, \quad (5.10)$$

где $p_{\text{ш}}$ – давление в шинах, принимаемое равным 0,6 МПа.

$$R = \sqrt{\frac{65}{0,1 \cdot 0,6 \cdot 3,14}} = 18,6$$

Для нескольких значений толщины покрытия h определяем:

1) **упругую характеристику плиты, см**

$$l_y = h \cdot \sqrt[3]{\frac{E_6 (1 - \mu_6^2)}{6E_3 (1 - \mu_6^2)}}, \quad (5.11)$$

где E_6 – модуль упругости цементобетона, МПа;

E_3 – эквивалентный модуль упругости на поверхности основания, МПа;

μ_6 – коэффициент поперечной деформации бетона (коэффициент Пуассона) принимается равным 0,2 для тяжелого и мелкозернистого бетона;

μ_3 – коэффициент Пуассона основания;

2) **напряжения растяжения при изгибе**, возникающие в бетонном покрытии от действия нагрузки, с учетом перепада температуры по толщине плиты, МПа

$$\sigma_{pt} = \frac{60K_m K_{\text{усл}} K_{\text{шт}} P}{h^2 K_t} \left(0,0592 - 0,21371g \frac{R}{l_y} \right), \quad (5.12)$$

где K_m – коэффициент, учитывающий влияние места расположения нагрузки для неармированных покрытий $K_m = 1,5$;

$K_{\text{усл}}$ – коэффициент, учитывающий условия работы $K_{\text{усл}} = 0,66$;

$K_{\text{шт}}$ – коэффициент, учитывающий влияние стытовых соединений на условия контактирования плит с основанием (при наличии в поперечных швах стытей $K_{\text{шт}} = 1,0$);

K_t – коэффициент, учитывающий влияние температурного коробления плит, определяемый по табл. 3.4 [1] или табл. 4.3 [2];

3) **коэффициент усталости бетона** при повторном нагружении

$$K_y = \frac{\sigma_{pt} K_{\text{уп}}}{K_{\text{шт}} B_{tb} K_F}. \quad (5.13)$$

Результаты вычислений приведены в следующей таблице:

$h, \text{ см}$	$l_{\text{в}}, \text{ см}$	$K_t, \text{ см}$	$\sigma_{\text{пл}}, \text{ см}$	$K_{\text{в2}}, \text{ см}$
18	70,91	0,80	2,43	0,50
20	78,78	0,85	2,19	0,45
22	86,66	0,80	2,01	0,41

Принимаем толщину покрытия $h = 21$ см, предварительно построив график зависимости $K_v = f(h)$.

5.8. Расчет по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев

Дорожную одежду проектируют из расчета, чтобы под действием кратковременных или длительных нагрузок в подстилающем грунте или малосвязных (песчаных) 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 обеспечено условие:

$$T \leq \frac{T_{\text{пр}}}{K_{\text{пр}}}, \quad (5.14)$$

где T – расчетное активное напряжение сдвига, МПа;

$T_{\text{пр}}$ – предельное активное напряжение сдвига в грунте рабочего слоя (или в песчаном материале промежуточного слоя), превышение которой вызывает нарушение прочности на сдвиг;

$K_{\text{пр}}$ – требуемое минимальное значение коэффициента прочности, определяемое с учетом заданного уровня надежности табл.3.1 [1] или табл. 3.2 [2]).

Данный расчет производят согласно ОДН 218.046–01 [3] с учетом того, что расчетный модуль упругости бетонного покрытия назначают по табл. 4.7 или табл.3.7 [1]:

1. Многослойную дорожную конструкцию приводят к двухслойной расчетной модели, находят модуль упругости верхнего слоя модели как средневзвешенный

$$E_{\text{ср}} = \frac{1650 \cdot 21 + 950 \cdot 16 + 130 \cdot 25}{21 + 16 + 25} = 856,45 \text{ МПа}$$

2. Определяют удельное напряжение сдвига от единичной нагрузки

$\bar{\tau}_n$ с помощью номограмм рис. 3.2 и 3.3 [4], зная $\frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{гр}}}$, $\frac{\sum h_i}{D}$ и $\varphi_{\text{гр}}$.

$$\text{При } \frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{гр}}} = \frac{856,45}{26,4} = 32,44; \quad \frac{\sum h_i}{D} = \frac{62}{33} = 1,88; \quad \varphi_{\text{гр}} = 2,1^\circ;$$

получаем $\bar{\tau}_n = 0,0127$.

3. Действующие в грунте или в песчаном слое активные напряжения сдвига находят по формуле

$$T = \bar{\tau}_n p \quad (5.15)$$

$$T = 0,0127 \cdot 0,6 = 0,00762 \text{ МПа}$$

4. Определяют предельное активное напряжение сдвига, МПа

$$T_{\text{пр}} = k_o (C_N + 0,1 \gamma_{\text{ср}} z_{\text{оп}} \text{tg} \varphi_{\text{ср}}), \quad (5.16)$$

где C_N – сцепление в грунте земляного полотна, МПа, принимаемое с учетом повторности нагрузки (табл. П.3.4 [1]);

$\gamma_{\text{ср}}$ – средневзвешенный удельный вес конструктивных слоев, расположенных выше проверяемого, $\text{кг}/\text{см}^3$;

$z_{\text{оп}}$ – глубина расположения поверхности слоя, проверяемого на сдвигустойчивость, от верха конструкции, см;

$\varphi_{\text{ср}}$ – расчетная величина угла внутреннего трения материала проверяемого слоя при статическом действии нагрузки (табл. П.3.4 [1]);

k_o – коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе песчаного слоя с нижним слоем несущего основания (выбирается в соответствии с п. 3.15 [3] $k_o = 4,5$).

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}, \quad (5.17)$$

где γ_i – удельный вес i -го слоя материала, $\text{кг}/\text{см}^3$ (табл. П.5.1 [5]).

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{0,0024 \cdot 21 + 0,002 \cdot 16 + 0,002 \cdot 25}{62} = 0,0021 \text{ кг}/\text{см}^3$$

При $z_{\text{оп}} = 62$ см; $\varphi_{\text{ср}} = 11,8^\circ$; $C_N = 0,0012$ МПа

$$T_{\text{пр}} = 4,5(0,0012 + 0,1 \cdot 0,0021 \cdot 62 \cdot \text{tg} 11,8^\circ) = 0,0176 \text{ МПа.}$$

Проверяем условие сдвигустойчивости: $0,00762 \leq \frac{0,0176}{0,94}$.

Конструкция удовлетворяет условию прочности по сдвигу в грунте.

Аналогично проводят расчет промежуточного песчаного слоя на устойчивость против сдвига:

$$E_{cp} = \frac{1650 \cdot 21 + 950 \cdot 16}{21 + 16} = 1347,30 \text{ МПа};$$

$$E_n = E'_s = 44,17 \text{ МПа}; \quad \frac{E_{cp}}{E_n} = \frac{1347,30}{44,17} = 30,50; \quad \frac{\sum h_i}{D} = \frac{37}{33} = 1,12;$$

$\varphi_{гр} = 29^\circ$. Получаем $\bar{\tau}_n = 0,011$, находим

$$T = 0,011 \cdot 0,6 = 0,0066 \text{ МПа};$$

$$\gamma_{cp} = \frac{0,0024 \cdot 21 + 0,002 \cdot 16}{37} = 0,0022.$$

При $z_{оп} = 37 \text{ см}$; $\varphi_{ст} = 35^\circ$; $C_N = 0,003 \text{ МПа}$

$$T_{np} = 4,5(0,003 + 0,1 \cdot 0,0022 \cdot 37 \cdot \text{tg}35^\circ) = 0,039 \text{ МПа}$$

$$0,0066 \leq \frac{0,039}{0,94}.$$

Условие по сдвигоустойчивости в песчаном слое основания выполняется.

5.9. Расчет основания

Рассчитаем полудлину и полуширину отпечатка следа колеса, относенного к нейтральной оси плиты, см

$$a = 0,87R + 0,5h; \quad (5.18)$$

$$b = 1,15R + 0,5h + 0,5b', \quad (5.19)$$

где R – радиус отпечатка колеса, см;

h – толщина покрытия, см;

b' – расстояние между отпечатками колес для двухколесной опоры, принимаемое равным 12,22 см.

$$a = 0,87 \cdot 18,6 + 0,5 \cdot 21 = 26,68 \text{ см}$$

$$b = 1,15 \cdot 18,6 + 0,5 \cdot 21 + 0,5 \cdot 12,22 = 38,0 \text{ см}$$

Расчетная длина и ширина эпюр отпора основания в случае приложения нагрузки:

в центральной части плиты

$$L_x^u = 2,5l_y^x + a; \quad (5.20)$$

$$L_y^u = 2,5l_y^y + b, \quad (5.21)$$

где $l_y^x = l_y^y = l_y$ – упругая характеристика плиты, см

$$L_x^u = 2,5 \cdot 81,88 + 26,68 = 231,38 \text{ см};$$

$$L_y^u = 2,5 \cdot 81,88 + 38,0 = 242,27 \text{ см};$$

на торце и на углу с обратным выгибом

$$L_x^T = 0,7 L_x^u; \quad (5.22)$$

$$L_y^T = 0,7 L_y^u; \quad (5.23)$$

$$L_x^T = 0,7 \cdot 231,38 = 161,97 \text{ см};$$

$$L_y^T = 0,7 \cdot 242,27 = 169,59 \text{ см}.$$

Поскольку под плитой основание толщиной h_0 укрепленное, то проверку на сдвиг проводим на глубине h_0 и увеличиваем L_x^T и L_y^T на $3h_0$. Тогда расчетное давление на основание при нагружении обоих углов плиты у поперечного шва, МПа

$$q_{\text{расч}} = \frac{27,4 \cdot P \cdot m_{\text{ст}}}{(L_x^T + 3h_0)(L_y^T + 3h_0)}, \quad (5.24)$$

где $m_{\text{ст}}$ – коэффициент, учитывающий влияние стыкового соединения, если стык работает, то $m_{\text{ст}} = 0,7$, если нет, то $m_{\text{ст}} = 1,0$.

$$q_{\text{расч}} = \frac{27,4 \cdot 65 \cdot 0,7}{(161,97 + 3 \cdot 16)(169,59 + 3 \cdot 16)} = 0,02729 \text{ МПа}$$

Определим коэффициенты, учитывающие размеры площадки нагружения

$$n_j = 1 - \frac{0,25 L_y^T}{L_x^T}; \quad (5.25)$$

$$n_q = 1 + \frac{1,5 L_y^T}{L_x^T}; \quad (5.26)$$

$$n_c = 1 + \frac{0,3 L_y^T}{L_x^T}; \quad (5.27)$$

$$n_j = 1 - \frac{0,25 \cdot 169,59}{161,97} = 0,74;$$

$$n_q = 1 + \frac{1,5 \cdot 169,59}{161,97} = 2,57;$$

$$n_c = 1 + \frac{0,3 \cdot 169,59}{161,97} = 1,31.$$

Найдем допустимое давление на основание, МПа

$$q_{\text{доп}} = \frac{m}{100K_n} \left[n_j A_1 L_y^T \gamma_{\text{гр}} + n_q A_2 (h + h_o + h_{\text{вс}}) \gamma_{\text{гр}} + n_c A_3 C \right], \quad (5.28)$$

где m – коэффициент, учитывающий условия работы ($m = 1,3$);

K_n – коэффициент надежности ($K_n = 1,1$);

A_1, A_2, A_3 – безразмерные коэффициенты, зависящие от угла внутреннего трения грунта (табл. 4.8 или табл. 3.5 [1]);

$\gamma_{\text{гр}}$ – удельный вес грунта, т/м³;

$h_{\text{вс}}$ – толщина выравнивающего слоя, м;

C – удельное сцепление грунта основания, МПа.

$$q_{\text{доп}} = \frac{1,3}{100 \cdot 1,1} [0,74 \cdot 0,25 \cdot 1,6959 \cdot 1,66 + 2,57 \cdot 1,99 \cdot 0,37 \cdot 1,66 + 1,31 \cdot 4,46 \cdot 0,0012] = 0,0434$$

Так как $q_{\text{расч}} < q_{\text{доп}}$, условие устойчивости основания против сдвига выполняется.

Определим высоту накапливаемых уступов между плитами, см

$$\omega_{\text{уст}} = \frac{8,5PK_o m_{\text{ст}}}{E_3^* L_y^T} (1 + K_q \lg(\sum N_p)), \quad (5.29)$$

где K_o – коэффициент, учитывающий влияние виброползучести при динамическом нагружении подвижной колесной нагрузкой (табл.3.6 [1]);

K_q – коэффициент, учитывающий влияние нагруженности основания по сдвигу:

$$K_q = \frac{q_{\text{расч}} - 0,15q_{\text{доп}}}{q_{\text{доп}}}; \quad (5.30)$$

$$K_q = \frac{0,02729 - 0,15 \cdot 0,0434}{0,0434} = 0,49.$$

Если стыки работают $K_o = 1,1$ и $m_{\text{ст}} = 0,7$

$$\omega_{\text{уст}} = \frac{8,5 \cdot 65 \cdot 1,1 \cdot 0,7}{85,29 \cdot 169,59} (1 + 0,49 \lg(1941068)) = 0,12 \text{ см}$$

Если стыки не работают $K_o = 1,5$ и $m_{\text{ст}} = 1,0$

$$\omega_{\text{уст}} = \frac{8,5 \cdot 65 \cdot 1,5 \cdot 1,0}{85,29 \cdot 169,59} (1 + 0,49 \lg(1941068)) = 0,23 \text{ см} = 2,3 \text{ мм},$$

что меньше $\omega_{\text{доп}} = 3$ мм, т.е. условие выполняется.

Вычисляем диаметр штырей в швах, мм

$$d_{\text{шт}} = \sqrt{\frac{10P_{\text{шт}}}{A_d R_u n K_d}}, \quad (5.31)$$

где A_d – коэффициент длины зоны обжатия бетона в месте входа в него штыря (для швов сжатия $A_d = 3$, для швов расширения $A_d = 1,5$);
 R_u – средняя прочность бетона на сжатие, МПа (допускается принимать $R_u \approx 8B_{тб}$);
 n – количество штырей на полосе наката или на длине l_y ;
 K_d – коэффициент запаса, равный 0,75;
 $P_{\text{шт}}$ – часть расчетной нагрузки на колесо, воспринимаемой штыревым соединением, определяется

$$P_{\text{шт}} = 0,9P \left(1 - \frac{\omega_{\text{шт}}}{\omega_{\text{пл}}} \right), \quad (5.32)$$

где $\omega_{\text{шт}}$ – податливость штырей при нагружении, мм (для швов сжатия $\omega_{\text{шт}} = 1,5$ мм, для швов расширения $\omega_{\text{шт}} = 2,0$ мм);
 $\omega_{\text{пл}}$ – расчетный прогиб края плиты от действия нагрузки, мм (для цементогрунтового основания $\omega_{\text{пл}} = 3$ мм).

Для швов сжатия

$$P_{\text{шт}} = 0,9 \cdot 65 \left(1 - \frac{1,5}{3} \right) = 29,25 \text{ кН};$$

$$d_{\text{шт}} = \sqrt{\frac{10 \cdot 29,25}{3 \cdot 8 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 0,75}} = 1,16 \text{ см} \approx 12 \text{ мм}.$$

Для швов расширения

$$P_{\text{шт}} = 0,9 \cdot 65 \left(1 - \frac{2,0}{3} \right) = 19,5 \text{ кН};$$

$$d_{\text{шт}} = \sqrt{\frac{10 \cdot 19,5}{1,5 \cdot 8 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 0,75}} = 1,16 \text{ см} \approx 12 \text{ мм}.$$

Найдем длину штыря:

$$L = 20 \cdot 1,20 + 5 + 5 + 1 = 34,2 \text{ см} \text{ – для швов сжатия};$$

$$L = 20 \cdot 1,20 + 5 + 5 + 3 = 36,2 \text{ см} \text{ – для швов расширения}.$$

5.10. Проверка дорожной конструкции на морозоустойчивость

Расчет конструкции на морозоустойчивость проводят в соответствии с положениями ОДН 218.046–01 исходя из допустимой величины при-

поднятия от выпучивания для цементобетонных покрытий при эксплуатации по первой расчетной схеме $l_{\text{доп}} = 3$ см.

Конструкцию считают морозоустойчивой, если выполняется условие

$$l_{\text{пуч}} \leq l_{\text{доп}}, \quad (5.33)$$

где $l_{\text{пуч}}$ – расчетное (ожидаемое) пучение грунта земляного полотна, определяемое по формуле

$$l_{\text{пуч}} = l_{\text{пуч ср}} K_{\text{УГВ}} K_{\text{пл}} K_{\text{гр}} K_{\text{нагр}} K_{\text{вл}}, \quad (5.34)$$

где $l_{\text{пуч ср}}$ – величина морозного пучения при осредненных условиях (рис.4.3 [3]) в зависимости от толщины дорожной одежды, группы грунта по степени пучинистости (табл.4.1 [3]) и глубины промерзания ($z_{\text{пр}}$).

$$z_{\text{пр}} = 1,38z_{\text{пр(ср)}}, \quad (5.35)$$

где $z_{\text{пр(ср)}}$ – средняя глубина промерзания для данного района, устанавливаемая при помощи изолиний на карте рис.4.4 [3];

$K_{\text{УГВ}}$ – коэффициент, учитывающий влияние расчетной глубины залегания уровня грунтовых и длительно стоящих вод (H_y) (рис.4.1 [3]);

$K_{\text{пл}}$ – коэффициент, зависящий от степени уплотнения грунта рабочего слоя (табл.4.4 [3]);

$K_{\text{гр}}$ – коэффициент, учитывающий влияние гранулометрического состава грунта основания насыпи или выемки (табл.4.5 [3]);

$K_{\text{нагр}}$ – коэффициент, учитывающий влияние нагрузки от собственного веса вышележащей конструкции на грунт в промерзающем слое и зависящий от глубины промерзания (рис.4.2 [3]);

$K_{\text{вл}}$ – коэффициент, зависящий от расчетной влажности грунта (табл.4.6 [3]).

В нашем случае:

$$z_{\text{пр(ср)}} = 1,10 \text{ м}; \quad z_{\text{пр}} = 1,38 \cdot 1,10 = 1,52 \text{ м}; \quad K_{\text{УГВ}} = 0,58; \quad K_{\text{пл}} = 1,0; \quad K_{\text{гр}} = 1,3;$$

$$K_{\text{нагр}} = 0,97; \quad K_{\text{вл}} = 1,28; \quad l_{\text{пуч ср}} = 7,67 \text{ см.}$$

$$l_{\text{пуч}} = 7,67 \cdot 0,58 \cdot 1,0 \cdot 1,3 \cdot 0,97 \cdot 1,28 = 7,18 \text{ см}$$

Принимаем $l_{\text{доп}} = 0,8 \cdot 3 = 2,4$ см. Так как при полученных значениях $l_{\text{пуч}} \geq l_{\text{доп}}$, условие не выполняется, необходимо рассчитать толщину теплоизолирующего слоя из пенопласта.

Определим теоретическое сопротивление дорожной одежды по формуле

$$R_{\text{од(о)}} = \sum_{i=1}^{i=n_{\text{од}}} \frac{h_{\text{од}(i)}}{\lambda_{\text{од}(i)}}, \quad (5.36)$$

где $n_{\text{од}}$ – число конструктивных слоев дорожной одежды;

$h_{\text{од}(i)}$ – толщина i -го слоя, м;

$\lambda_{\text{од}(i)}$ – коэффициент теплопроводности отдельных слоев в мерзлом состоянии, Вт/(мК) (табл.П.5.1 [3]).

$$R_{\text{од(о)}} = \frac{0,21}{1,74} + \frac{0,16}{2,02} + \frac{0,25}{2,32} = 0,31 \text{ м}^2\text{К/Вт}$$

Требуемое термическое сопротивление

$$R_{\text{од(тр)}} = R_{\text{пр}} K_{\text{од}} K_{\text{увл}} \delta, \quad (5.37)$$

где $K_{\text{од}}$ – коэффициент, учитывающий срок службы дорожной одежды между капитальными ремонтами (табл.4.7 [3]);

$K_{\text{увл}}$ – коэффициент, учитывающий схему увлажнения рабочего слоя земляного полотна, принимаемый при 2-й и 3-й схемах равным 1,0, а при 1-й схеме – по табл.4.8[3];

δ – понижающий коэффициент, равный для П₁, П₃ и П₅ дорожно-климатических подзон 1,0; для П₂, П₄ и П₆ равный 0,95; для III-й ДКЗ – 0,9; для IV – 0,85;

$R_{\text{пр}}$ – приведенное термическое сопротивление, определяемое при помощи номограммы (рис.4.6 [3]).

В нашем случае $K_{\text{од}} = 1,0$; $K_{\text{увл}} = 1,0$; $\delta = 1,0$. Определим $\frac{l_{\text{доп}}}{C_{\text{пуч}} C_{\text{р}}}$, где

$l_{\text{доп}} = 3$ см; $C_{\text{пуч}}$ – показатель пучинистости грунта (табл.4.11 [4]) (для суглинка тяжелого пылеватого $C_{\text{пуч}} = 1,5$); $C_{\text{р}}$ найдем по табл. 4.10 [3]: при толщине дорожной одежды $h_{\text{од}} = 0,62$ м, расстоянии до УГВ $H_{\text{у}} = 2,4$ м, принимая допустимую глубину промерзания $h_{\text{пр(доп)}} = 0-0,5$ м методом интерполяции между $h_{\text{од}} = 0,5$ м и $h_{\text{од}} = 1,0$ м определяем

$C_{\text{р}} = 0,828$. Тогда $\frac{l_{\text{доп}}}{C_{\text{пуч}} C_{\text{р}}} = \frac{3}{1,5 \cdot 0,828} = 2,4$; по номограмме получим

$h_{\text{пр(доп)}} = 0,75$ м.

Значит, принимаем $h_{\text{пр(доп)}} = 0,51-1,0$ м, определяем интерполяцией

$C_{\text{р}} = 0,789$. Тогда $\frac{l_{\text{доп}}}{C_{\text{пуч}} C_{\text{р}}} = \frac{3}{1,5 \cdot 0,789} = 2,5$; по номограмме получим

$R_{\text{пр}} = 0,628 \text{ м}^2\text{К/Вт}$.

$$R_{\text{од(тр)}} = 0,628 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,628 \text{ м}^2\text{К/Вт}$$

По номограмме на рис.4.7 [3] находим толщину слоя из пенопласта $h_{\text{п}} = 1,5$ см, но учитывая минимальные размеры плиты пенопласта, принимаем толщину теплоизолирующего слоя 3 см.

Библиографический список

1. Методические рекомендации по проектированию жестких дорожных одежд: Введ. с 01.01.2004.
2. *Гридчин, А.М.* Основы проектирования автомобильных дорог: учебное пособие/А.М. Гридчин, Н.Г.Горшкова. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2006. – Ч.2 – 198 с.
3. ОДН 218.046–01. Проектирование нежестких дорожных одежд: Введ. с 01.01.2001.

Оглавление

Введение	3
1. Исходные данные	3
2. Общие положения конструирования жестких дорожных одежд ..	4
3. Конструкция монолитных цементобетонных покрытий	6
4. Расчет монолитных цементобетонных покрытий	9
4.1. Общие положения	9
4.2. Расчетные параметры подвижной нагрузки	10
4.3. Определение расчетных характеристик материалов конструктивных слоев дорожной одежды и грунта земляного полотна	12
4.4. Определение эквивалентного модуля упругости основания ...	13
4.5. Определение расчетной прочности бетона	14
4.6. Определение толщины покрытия	15
4.7. Расчет по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев	16
4.8. Расчет основания	16
4.9. Проверка конструкции дорожной одежды на морозоустойчивость и дренирующую способность	20
5. Пример расчета	21
Библиографический список	35

Учебное издание

**Конструирование и расчет жесткой
дорожной одежды**

для студентов специальности

270205 – Автомобильные дороги и аэродромы и
бакалавров по направлению 270800 – «Строительство»
профиля подготовки «Автомобильные дороги и аэродромы»

Составители: Горшкова Нина Георгиевна
Погромский Алексей Сергеевич

Редактор В.И. Пустовая

Подписано в печать 22.12.08. Формат 60x84/16. Усл.печ.л. 2,1. Уч-изд.л. 2,3.

Тираж 100 экз.

Заказ

Цена

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В.Г. Шухова

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46