



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Автомобильные дороги»

Учебно-методическое пособие
по дисциплине
«Основы проектирования дорог»

**«Проектирование нежестких
дорожных одежд в России
и за рубежом»**



Авторы
Углова Е.В.,
Конорева О.В.

Ростов-на-Дону, 2017

Аннотация

Учебное пособие предназначено для бакалавров и магистрантов по направлениям 08.03.01 и 08.04.01 «Строительство». Содержит описание процедуры проектирования нежестких дорожных одежд согласно российским и зарубежным нормативным документам.

В приложении приведены справочные данные, освобождающие студентов от их поисков в малодоступных литературных источниках.

Учебное пособие может быть использовано при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Авторы

д.т.н., проф., заведующий кафедрой
«Автомобильные дороги»

Углова Е.В.

к.т.н., доц. кафедры

«Автомобильные дороги»

Конорева О.В.





Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ЧАСТЬ 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	9
1.1. Основные положения.....	9
1.2. Общая процедура и критерии расчета на прочность	12
1.3. Расчетные параметры подвижной нагрузки	12
1.4. Расчет конструкции в целом по допускаемому упругому прогибу.....	16
1.5. Расчет по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев..	18
1.6. Расчет конструкции на сопротивление монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе	22
Контрольные вопросы к части 1	25

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебное пособие имеет цель улучшить подготовку бакалавров и магистров по направлению «Строительство». Пособие углубляет теоретические знания по курсу «Основы проектирования автомобильных дорог» путем освоения новых методов проектирования и расчета дорожных конструкций, используемых в зарубежных странах, а также всестороннего анализа существующего метода проектирования в России.

Изучение истории развития методов расчета нежестких дорожных одежд, как в нашей стране, так и за рубежом показало, что методы расчета совершенствовались и изменялись не только вследствие углубления теоретических исследований напряженно-деформированного состояния дорожных одежд (важнейшие результаты получены российскими и зарубежными учеными С.Я. Шехтер, Б.И. Коган, Бурмистер, Раппопорт и др.), но и вследствие изменения конструкции дорожной одежды и вида транспортных нагрузок. Авторы методов расчета использовали различные критерии прочности дорожных конструкций, объясняя и обосновывая их эффективность на предположении о доминировании тех или иных процессов, происходящих в элементах дорожной конструкции при эксплуатации и приводящих к отказу дорожной конструкции в целом.

На начальном этапе в 30-40-х годах прошлого столетия основным критерием прочности являлась несущая способность подстилающего грунта (метод расчета, предложенный Н.Н. Ивановым, Калифорнийский метод, Канадский метод [2]), что было обусловлено малой толщиной слоев дорожной одежды, и как следствие значительными нагрузками на грунт земляного полотна. Увеличение интенсивности движения на автомобильных дорогах требовало упрочнение конструкции дорожной одежды и учета многократности приложения транспортных нагрузок в ходе ее расчета. С появлением метода расчета СоюздорНИИ [5] вопрос назначения конструкций дорожных одежд был поднят на несравненно более высокий уровень инженерного проектирования, так как позволял в комплексе учитывать климатические условия, свойства материалов конструктивных слоев, состав и интенсивность движения. В методе расчета Союздорнии в качестве критерия предельного состояния принимается величина накопленного относительного вертикального смещения поверхности покрытия.

В 1952 году М.Г.Корсунским был опубликован метод расчета одежд нежесткого типа по предельным относительным удлинени-

ям [6]. В качестве критерия предельного состояния здесь принята величина максимального относительного удлинения материала покрытия при прогибе. Принятие в качестве критерия прочности предельного относительного удлинения материала покрытия в большей степени физически оправдано, так как позволяет более точно учитывать конструктивные особенности дорожной одежды (отношение модулей упругости покрытия и основания, толщину конструктивных слоев, свойства материала покрытия). Следует отметить, что еще в 1938 г. данный критерий предложен в статье Б.И. Покровского, посвященной принципам конструирования и расчета нежестких дорожных одежд [11]. Однако только в 50-х годах прошлого столетия этому критерию стали уделять должное внимание, что связано, во-первых, с повышением роли асфальтобетонного покрытия в деформировании дорожной одежды (толщина слоев асфальтобетона увеличилась до 10-15 см), а во-вторых, с улучшением физико-механических, прочностных показателей применяемых асфальтобетонов и необходимостью учета этих факторов при проектировании дорожной одежды.

Методы расчета нежестких дорожных одежд, разработанные в более поздний период, уже основываются не на одном критерии прочности, а включали два, три и более условий прочности. Б.И. Коган [3, 4] в качестве основного критерия принимает допустимое относительное вертикальное смещение поверхности покрытия и в качестве дополнительного – максимальное растягивающее напряжение в нижней части покрытия.

Совместные исследования ведущих научных школ Советского Союза (Союздорнии, МАДИ, ХАДИ, КАДИ и др. научно-исследовательских организаций) позволили в 70-е годы прошлого столетия разработать метод расчета нежестких дорожных одежд, основные положения которого используются до настоящего времени [1, 2, 7, 13]. В основу метода положены три условия прочности:

- предельный упругий прогиб дорожной одежды в неблагоприятный период года под нагрузкой расчетного автомобиля;
- предельное равновесие по сдвигу в грунтах и конструктивных слоях, не обладающих связностью;
- допустимое напряжение при изгибе в монолитных слоях с учетом повторности приложения нагрузки, режима движения.

Необходимость применения нескольких критериев прочности при расчете дорожных одежд обусловлена разнообразием дорожных конструкций, устраиваемых на автомобильных дорогах с различной интенсивностью движения: капитального, облегченно-

го, переходного типа.

Важный вывод о невозможности создания единого универсального критерия расчета нежестких дорожных одежд был получен Кривисским А.М. [8, 9]. Так, например, дорожные одежды капитального типа должны конструироваться таким образом, чтобы на них не накапливались остаточные деформации, а на конструкциях облегченного типа в неблагоприятный период года может быть допущена стадия малых пластических деформаций и т.д. Следовательно, в каждом отдельном случае, отказ дорожной одежды может быть вызван и разным критерием прочности.

Выводы, полученные в 70-е годы относительно работы различных типов дорожных одежд, во многом верны и в настоящее время. Однако следует обратить внимание, что конструкция капитальных дорожных одежд за последние годы существенно изменилась. Рост интенсивности движения, появление в составе транспортного потока большого количества большегрузных транспортных средств потребовало значительного увеличения толщин конструктивных слоев, и в первую очередь, покрытия. И если в 70-е годы наиболее распространенной конструкцией являлась дорожная одежда с асфальтобетонным покрытием толщиной 10 см, уложенном на гравийно-щебеночное основание толщиной 35 см, то современные дорожные конструкции включают асфальтобетонные слои, общая толщина которых достигает 20-30 см, укрепленное основание и щебеночный слой. Значительное увеличение толщины конструктивных слоев позволило существенно повысить несущую способность (прочность) дорожных одежд и снизить величину напряжений, возникающих в элементах дорожной конструкции при проезде одного транспортного средства. Одновременно с этим резко возросшая интенсивность движения (на автомагистрали МКАД интенсивность на отдельных перегонах достигает – 58 000 авт/сут, на магистрали в Южной Калифорнии – 18 000 расчетных автомобилей с осевой нагрузкой 8 т в сутки) потребовала повышенного внимания к вопросу накопления деформаций в элементах дорожной конструкции при многократном приложении транспортных нагрузок. Именно поэтому наметилась тенденция к переходу от расчета дорожных одежд по предельным состояниям в наиболее неблагоприятные периоды года к расчету и прогнозированию деформаций и разрушений, происходящих в дорожной конструкции за весь срок эксплуатации.

По мнению Радовского Б.С. принятые в нашей стране критерии расчета дорожной одежды пока не позволяют прогнозировать срок ее службы [12]. В значительной мере это объясняется

нечеткостью понятия отказа для дорожной одежды. В нормативном документе по проектированию нежестких дорожных одежд [10] указано, что «отказ дорожной конструкции по прочности может характеризоваться образованием продольной и поперечной неровности, связанной с прочностью дорожной конструкции (поперечные неровности, колея, усталостные трещины), с последующим развитием других видов деформаций и разрушений (частые трещины, сетка трещин, выбоины, просадки и проломы и т.д.)». Однако на стадии проектирования различные виды разрушений дорожной одежды не прогнозируются, а расчетные значения коэффициентов прочности по трем критериям расчета не позволяют определять срок службы дорожной одежды до образования предельно допустимых разрушений.

Анализ методов расчета дорожных конструкций позволяет сделать следующие основные выводы:

1) Методы расчета нежестких дорожных одежд совершенствовались вследствие углубления теоретических исследований их напряженно-деформированного состояния и в виду изменений конструкций дорожной одежды, вызванными возрастающими с каждым годом транспортными нагрузками. В 50-х годах прошлого столетия значительное внимание стали уделять критерию предельного относительного удлинения материала покрытия при прогибе, что связано, во-первых, с повышением роли асфальтобетонного покрытия в деформировании дорожной одежды (толщина слоев асфальтобетона увеличилась до 10-15 см), а во-вторых, с улучшением физико-механических, прочностных показателей применяемых асфальтобетонов и необходимостью учета этих факторов при проектировании дорожной одежды.

2) Значительное увеличение интенсивности движения на автомобильных дорогах за последние 20 лет потребовало всестороннего учета многократности приложения нагрузки и перехода от расчета дорожных одежд по предельным состояниям в наиболее неблагоприятные периоды года к расчету и прогнозированию деформаций и разрушений, накапливаемых в дорожной конструкции за весь срок эксплуатации.

3) В разработанном в 2001 году нормативном документе ОДН 218.046-01 [10] сделана попытка преобразования расчета дорожной одежды по допустимому напряжению при изгибе в монолитных слоях в расчет монолитных слоев на усталостное сопротивление с учетом количества приложений транспортной нагрузки за срок службы. Однако, данная методика имеет ряд недостатков и не позволяет оценивать усталостный ресурс асфальтобе-

тонных покрытий.

4) В настоящее время за рубежом при расчете нежестких дорожных одежд все большее значение приобретает механистический подход, позволяющий разрабатывать модели усталостного разрушения асфальтобетонных покрытий. Этот подход включает вычисление магистральных (основных) реакций в системе нежесткой дорожной одежды и расчет накапливаемых повреждений в конце каждого анализируемого периода времени.

5) Известные модели усталостного разрушения асфальтобетонных покрытий используются на стадии проектирования дорожных конструкций и не позволяют прогнозировать остаточный срок службы дорожных покрытий на стадии эксплуатации.

ЧАСТЬ 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В Российской Федерации расчет нежестких дорожных одежд ведется на основании ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд».

Далее будут приведены основные положения расчетов по данному нормативному документу.

1.1. Основные положения

Под прочностью дорожной одежды понимают способность сопротивляться процессу развития остаточных деформаций и разрушений под воздействием касательных и нормальных напряжений, возникающих в конструктивных слоях и подстилающем грунте от расчетной нагрузки (кратковременной, многократной или длительно действующей однократной), приложенной к поверхности покрытия.

Методика оценки прочности конструкции включает как оценку прочности конструкции в целом (с использованием эмпирической зависимости допускаемого упругого прогиба от числа приложений нагрузки), так и оценку прочности с учетом напряжений, возникающих в отдельных конструктивных слоях и устанавливаемых с использованием решений теории упругости.

Дорожную одежду следует проектировать с требуемым уровнем надежности, под которой понимают вероятность безотказной работы в течение межремонтного периода. Отказ конструкции по прочности физически может характеризоваться образованием продольной и поперечной неровности поверхности дорожной одежды, связанной с прочностью конструкции (поперечные неровности, колея, усталостные трещины), с последующим развитием других видов деформаций и разрушений (частые трещины, сетка трещин, выбоины, просадки, проломы и т.д.). Номенклатура дефектов и методика количественной оценки их определяется специальными нормами, используемыми при эксплуатации дорог.

В качестве количественного показателя отказа дорожной одежды как элемента инженерного сооружения линейного характера используют предельный коэффициент разрушения $K_p^{пр}$, представляющий собой отношение суммарной протяженности (или суммарной площади) участков дороги, требующих ремонта

из-за недостаточной прочности дорожной одежды, к общей протяженности (или общей площади) дороги между корреспондирующими пунктами. Значения $K_p^{пр}$ на последний год службы в зависимости от капитальности дорожной одежды и категории дороги следует принимать в соответствии с табл. 1.1.

Прочность конструкции количественно оценивается величиной коэффициента прочности.

Коэффициент прочности вновь проектируемой конструкции должен быть таким, чтобы в заданный межремонтный период не наступил отказ по прочности с вероятностью более заданной, т.е. чтобы была обеспечена заданная (требуемая) надежность.

Для обеспечения заданной надежности (обеспеченности по прочности) коэффициент прочности проектируемой конструкции по каждому из расчетных критериев не должен быть ниже минимального требуемого значения, определяемого по табл. 1.1.

В задачу расчета входит определение толщин слоев одежды в вариантах, намеченных при конструировании, или выбор материалов соответствующими деформационными и прочностными характеристиками при заданных толщинах слоев.

Таблица 1.1. Требуемые минимальные коэффициенты прочности при заданных уровнях надежности для расчета дорожных одежд по различным критериям прочности

Тип дорожной одежды		Капитальный										
Категория дороги		I		II		III			IV			
Предельный коэффициент разрушения K_p^{np}		0,05				0,10						
Заданная надежность K_n		0,98	0,95	0,98	0,95	0,98	0,95	0,90	0,95	0,90	0,85	0,80
Требуемый коэффициент прочности $K_{np}^{тр}$ по критерию:	упругого прогиба	1,50	1,30	1,38	1,20	1,29	1,17	1,10	1,17	1,10	1,06	1,02
	сдвига и растяжения при изгибе	1,10	1,00	1,10	1,00	1,10	1,00	0,94	1,00	0,94	0,90	0,87
Тип дорожной одежды		Облегченный										
Категория дороги		III			IV				V			
Предельный коэффициент разрушения K_p^{np}		0,15										
Заданная надежность K_n		0,98	0,95	0,90	0,95	0,90	0,85	0,80	0,95	0,90	0,80	0,70
Требуемый коэффициент прочности $K_{np}^{тр}$ по критерию:	упругого прогиба	1,29	1,17	1,10	1,17	1,10	1,06	1,02	1,13	1,06	0,98	0,90
	сдвига и растяжения при изгибе	1,10	1,00	0,94	1,00	0,94	0,90	0,87	1,00	0,94	0,87	0,80

Тип дорожной одежды		Переходный									
Категория дороги		IV					V				
Предельный коэффициент разрушения K_p^{np}		0,40									
Заданная надежность K_n		0,95	0,90	0,85	0,80	0,95	0,90	0,80	0,70		
Требуемый коэффициент прочности $K_{np}^{тр}$ по критерию:	упругого прогиба	1,17	1,10	1,06	1,02	1,13	1,06	0,98	0,90		
	сдвига и растяжения при изгибе ¹	1,00	0,94	0,90	0,87	1,00	0,94	0,87	0,80		

¹ Дорожные одежды переходного типа для дорог V категории по критерию растяжения при изгибе не рассчитывают.

1.2. Общая процедура и критерии расчета на прочность

Последовательность расчета:

1.2.1. Расчет дорожной одежды по критерию **упругого прогиба** на основе зависимости требуемого общего модуля упругости конструкции от суммарного числа приложений нагрузки.

В результате этого расчета назначаются толщины конструктивных слоев и их модули упругости таким образом, чтобы общий модуль упругости дорожной одежды был не менее требуемого с учетом соответствующего коэффициента прочности (табл. 1).

1.2.2. Расчет дорожной одежды, отвечающей критерию упругого прогиба, с учетом механизма нарушения прочности в ее отдельных конструктивных слоях ведут по двум независимым критериям:

- критерию соответствия **сдвигоустойчивости** материалов конструктивных слоев и грунта возникающим в них касательным напряжениям, отражающему условие ограничения накопления сдвиговых остаточных деформаций (формоизменения) под воздействием многократных кратковременных нагрузок;

- по критерию соответствия **сопротивления материалов монолитных конструктивных слоев возникающим в них растягивающим напряжениям** от подвижной многократной нагрузки, отражающему сопротивление этих слоев усталостным процессам, обуславливающим развитие микротрещин в монолитных слоях, потерю их сплошности и снижение распределяющей способности.

Коэффициенты прочности по этим критериям должны быть не менее значений, указанных в табл. 1.1.

При недостаточной величине коэффициента прочности по любому критерию конструкцию уточняют.

1.2.3. Дорожные одежды переходного и низшего типов рассчитывают по упругому прогибу и по сдвигоустойчивости.

Конструкции, предназначенные для движения особо тяжелых транспортных средств (со статической нагрузкой на ось 120 кН и более), по упругому прогибу не рассчитывают.

1.3. Расчетные параметры подвижной нагрузки

1.3.1. В качестве расчетной схемы нагружения конструкции колесом автомобиля принимается гибкий круговой штамп диаметром D , передающий равномерно распределенную нагрузку величиной p .

Величины расчетного удельного давления колеса покрытия p и расчетного диаметра D приведенного к кругу отпечатка расчетного колеса на поверхности покрытия назначают с учетом параметров расчетных типов автомобилей.

В качестве расчетного типа используют наиболее тяжелый автомобиль из систематически обращающихся по дороге, доля которых составляет не менее 10 % (с учетом перспективы изменения состава движения к концу межремонтного срока).

Приведение различных типов автомобилей к расчетному типу и приведение расчетного типа к расчетной схеме нагружения осуществляется в соответствии с указаниями табл. 1.2.

1.3.2. Расчетные нагрузки

При проектировании дорожных одежд в качестве расчетных принимают нагрузки, соответствующие предельным нагрузкам на ось расчетного двухосного автомобиля.

Если в задании на проектирование расчетная нагрузка не оговорена специально, за расчетную принимают нагрузку, соответствующую расчетному автомобилю группы А (табл. 1.2).

Таблица 1.2.

Группа расчетной нагрузки	Нормативная статическая нагрузка на ось, кН	Нормативная статическая нагрузка на поверхность покрытия от колеса расчетного автомобиля, $Q_{расч.}$, кН	Расчетные параметры нагрузки	
			P , МПа	D , см
A1	100	50	0,60	37/33
A2	110	55	0,60	39/34
A3	130	65	0,60	42/37

Примечание: В числителе – для движущегося колеса, в знаменателе – для неподвижного.

Величину p принимают равной давлению воздуха в шинах. Диаметр расчетного отпечатка шины D определяют из зависимости:

$$D = \sqrt{\frac{40 \times Q_{расч}}{\pi \times p}} \quad (1.1)$$

где $Q_{расч}$ – расчетная величина нагрузки, передаваемой колесом на поверхность покрытия, кН;

p – давление, МПа.

(Значения D и p для расчетной нагрузки типа А см.

табл. 1.2).

1.3.3. Учет характера действующей нагрузки (кратковременное многократное нагружение, статическое нагружение) осуществляется через принятие соответствующих расчетных значений расчетных характеристик конструктивных слоев, а также через введение коэффициента динамичности при назначении величины нагрузки.

1.3.4. 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.

1.3.5. Перспективную общую среднесуточную интенсивность устанавливают по данным анализа закономерностей изменения объема перевозок и интенсивности движения при проведении титульных экономических обследований.

1.3.6. Величину N_p приведенной интенсивности на последний год срока службы определяют по формуле:

$$N_p = f_{пол} \sum_{m=1}^n N_m S_{m сум}, \text{ ед/сут}, \quad (1.2)$$

где $f_{пол}$ – коэффициент, учитывающий число полос движения и распределение движения по ним, определяемый по табл. 1.3;

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;

$S_{m сум}$ – суммарный коэффициент приведения воздействия на дорожную одежду транспортного средства m -й марки к расчетной нагрузке $Q_{расч}$.

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

$$\sum N_p = f_{пол} \sum_{m=1}^n (N_{1m} K_c T_{ндз} 0,7) S_{мсум} k_n, \quad (1.3)$$

или по формуле:

$$\sum N_p = 0,7 N_p \frac{K_c}{q^{(T_{сл} - 1)}} T_{ндз} k_n, \quad (1.4)$$

где n – число марок автомобилей;

N_{1m} – суточная интенсивность движения автомобилей m -й марки в первый год службы (в обоих направлениях), авт/сут; 18

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

$T_{ндз}$ – расчетное число расчетных дней в году, соответствующих определенному состоянию деформируемости конструкции;

k_n – коэффициент, учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого (табл. 1.4);

K_c – коэффициент суммирования определяют по формуле:

$$K_c = \frac{q^{T_{сл}} - 1}{q - 1}, \quad (1.5)$$

где $T_{сл}$ – расчетный срок службы;

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

Таблица 1.3

Число полос движения	Значение коэффициента $f_{пол}$ 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 $f_{пол} = 0,01$.

3. На многополосных дорогах допускается проектировать одежду переменной толщины по ширине проезжей части, рассчитав дорожную одежду в пределах различных полос в соответствии со значениями N_p , найденными по формуле (1.2).

4. На перекрестках и подходах к ним (в местах перестройки потока автомобилей для выполнения левых поворотов и др.) при расчете одежды в пределах всех полос движения следует принимать $f_{пол} = 0,50$, если общее число полос проезжей части проектируемой дороги более трех.

Таблица 1.4

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	–
Облегченный	–	1,47	1,32	1,26	1,06
Переходный	–	–	1,19	1,16	1,04

1.4. Расчет конструкции в целом по допускаемому упругому прогибу

1.4.1. Конструкция дорожной одежды в целом удовлетворяет требованиям прочности и надежности по величине упругого прогиба при условии:

$$E_{об} > E_{min} K_{np}^{mp}, \quad (1.6)$$

где $E_{об}$ – общий расчетный модуль упругости конструкции, МПа;
 E_{min} – минимальный требуемый общий модуль упругости конструкции, МПа;
 $K_{пр}^{Tr}$ – требуемый коэффициент прочности дорожной одежды по критерию упругого прогиба, принимаемый в зависимости от требуемого уровня надежности (см. табл. 1.1).

1.4.2. Величину минимального требуемого общего модуля упругости конструкции вычисляют по эмпирической формуле:

$$E_{min} = 98,65 [lg(\sum N_p) - c], \text{ (МПа)}, \quad (1.7)$$

где $\sum N_p$ – суммарное расчетное число приложений нагрузки за срок службы дорожной одежды, устанавливаемое в соответствии с п. 2.7 (формулы 1.3 и 1.4);
 c – эмпирический параметр, принимаемый равным для расчетной нагрузки на ось 100 кН – 3,55; 110 кН – 3,25; 130 кН – 3,05.

Примечания: 1. Формулой следует пользоваться при $\sum N_p > 4 \cdot 10^4$.

2. Для дорог в V дорожно-климатической зоне требуемые модули, определенные по формуле (1.7), следует уменьшить на 15 %.

3. Независимо от результата, полученного по формуле (1.7), требуемый модуль упругости должен быть не менее указанного в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Категория дороги	Суммарное минимальное расчетное число приложений расчетной нагрузки на наиболее нагруженную полосу	Требуемый модуль упругости одежды, МПа		
		капитальной	облегченной	переходной
I	750000	230	–	–
II	500000	220	210	–
III	375000	200	200	–
IV	110000	–	150	100
V	40000	–	100	50

1.4.3. Общий расчетный модуль упругости конструкции определяют с помощью номограммы, построенной по решению теории упругости для модели многослойной среды.

Приведение многослойной конструкции к эквивалентной однослойной ведут послойно, начиная с подстилающего грунта (рис.1.1).

1.4.4. Значения модулей упругости материалов, содержащих органическое вяжущее, необходимо принимать во всех климатических зонах при температуре +10 °С.

1.4.5. Расчет по допустимому упругому прогибу (по требуемому модулю деформации) ведут в следующей последовательности:

1.4.5.1. Определяют требуемый минимальный общий модуль конструкции по формуле 1.7.

1.4.5.2. Назначают модули и предварительно толщины слоев конструкции (кроме толщины основания).

1.4.5.3. Выполняя расчет конструкции сверху вниз, определяют с помощью номограммы (рис. П.1.1), требуемые модули на поверхности каждого конструктивного слоя.

1.4.5.4. Выполняя расчет конструкции снизу вверх, определяют толщину основания (при заданном его модуле), обеспечивающую необходимый модуль на поверхности основания, полученный при расчете сверху.

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

1.5.1. 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 (песчаных) слоях обеспечено условие:

$$T \leq \frac{T_{np}}{K_{np}^{mp}}, \quad (1.8)$$

где K_{np}^{Tr} – требуемый коэффициент прочности дорожной одежды по критерию упругого прогиба, принимаемый в зависимости от требуемого уровня надежности (см. табл. 1.1).

T – расчетное активное напряжение сдвига (часть сдвигающего напряжения, непогашенная внутренним трением) в расчетной (наиболее опасной) точке конструкции от действующей временной нагрузки (п. 1.5.5);

$T_{пр}$ – предельная величина активного напряжения сдвига (в той же точке), превышение которой вызывает нарушение прочности на сдвиг (п. 4.6).

1.5.2. При практических расчетах многослойную дорожную конструкцию приводят к двухслойной расчетной модели.

При расчете дорожной конструкции *на прочность по сдвигоустойчивости грунта земляного полотна* в качестве нижнего принимают грунт (с его характеристиками), а в качестве верхнего – всю дорожную одежду (рис. 1.1). Толщину верхнего слоя h_v

принимают равной сумме толщин слоев одежды $\left(\sum_{i=1}^n h_i \right)$

Модуль упругости верхнего слоя модели вычисляют как средневзвешенный по формуле:

$$E_B = \frac{\left(\sum_{i=1}^n E_i h_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n h_i \right)}, \quad (1.9)$$

где n – число слоев дорожной одежды;

E_i – модуль упругости i -го слоя;

h_i – толщина i -го слоя.

1.5.3. При расчете по условию сдвигоустойчивости в песчаном слое основания с помощью номограммы (рис. 1.3) нижнему слою двухслойной модели условно присваивают обычные характеристики песчаного слоя (c_n, φ_n), а модуль упругости принимают равным общему модулю на поверхности песчаного слоя, толщину верхнего слоя модели принимают равной общей толщине слоев, лежащих над песчаным, а модуль упругости E_B вычисляют как средневзвешенное значение для этих слоев по формуле 1.9.

1.5.4. При расчете дорожных одежд по условию сдвигоустойчивости значения модулей упругости материалов, содержащих органическое вяжущее, принимают соответствующими температурам, указанным в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Дорожно-климатические зоны	I-II	III	IV	V
Расчетная температура, °C	+20	+30	+40	+50

1.5.5. Действующие в грунте или в песчаном слое активные напряжения сдвига (T) вычисляют по формуле:

$$T = \tau \cdot p, \quad (1.10)$$

где τ – удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки, определяемое с помощью номограмм (рис. П.1.2, П.1.3);

p – расчетное давление от колеса на покрытие.²³

Примечание: При пользовании номограммой для определения τ величину φ принимают для случая воздействия динамической нагрузки (с учетом числа приложений).

1.5.6. Предельное активное напряжение сдвига T_{np} в грунте рабочего слоя (или в песчаном материале промежуточного слоя) определяют по формуле:

$$T_{np} = c_N k_d + 0,1 \gamma_{cp} z_{on} t g \varphi_{CT}, \quad (1.11)$$

где c_N – сцепление в грунте земляного полотна (или в промежуточном песчаном слое), МПа, принимаемое с учетом повторности нагрузки;

k_d – коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе песчаного слоя с нижним слоем несущего основания. При устройстве нижнего слоя из укрепленных материалов, а также при укладке на границе “основание – песчаный слой” разделяющей геотекстильной прослойки, следует принимать значения k_d равным:

- 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.

$Z_{оп}$ – глубина расположения поверхности слоя, проверяемого на сдвигоустойчивость, от верха конструкции, см;

$\gamma_{ср}$ – средневзвешенный удельный вес конструктивных слоев, расположенных выше проверяемого слоя, кг/см³;

$\phi_{ст}$ – расчетная величина угла внутреннего трения материала проверяемого слоя при статическом действии нагрузки.

1.5.7. Во всех случаях в качестве расчетных значений угла внутреннего трения грунта и малосвязных слоев используют его значения, отвечающие расчетному суммарному числу воздействия нагрузки за межремонтный срок $\sum N_p$. Эту величину устанавливают по формуле (1.3).

Входящую в формулу (1.3) величину расчетных дней в году, соответствующих расчетному состоянию прочности и деформируемости конструкции $T_{рдг}$ определяют по специальным региональным справочным данным.

1.5.8. Расчет дорожной одежды по сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна, а также в песчаных материалах промежуточных слоев дорожных одежд ведут в следующей последовательности:

а) назначают расчетные модули упругости для слоев из асфальтобетона, соответствующие максимально возможным температурам в ранний весенний (расчетный) период; назначают (с учетом расчетной влажности и общего числа воздействия нагрузки) расчетные прочностные характеристики ϕ и c грунта земляного полотна и песка промежуточного слоя одежды (если таковой имеется). Остальные расчетные характеристики грунта и материалов остаются теми же, что и в расчете по упругому прогибу;

б) по номограммам определяют активные напряжения сдвига $\overline{\tau}_H$ от единичной временной нагрузки. Для этого приводят многослойную конструкцию к двухслойным моделям (рис. 1.1);

в) по формуле 1.10 вычисляют расчетное напряжение сдвига в грунте земляного полотна или в песчаном слое одежды;

г) по формуле 1.11 вычисляют предельное напряжение сдвига;

д) по формуле 1.8 проверяют выполнение условия прочности (с учетом требуемой надежности);

е) при необходимости, изменяя толщины конструктивных слоев, подбирают конструкцию, удовлетворяющую условию п. 1.5.1.

1.6. Расчет конструкции на сопротивление монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе

1.6.1. В монолитных слоях дорожной одежды (из асфальтобетона, дегтебетона, материалов и грунтов, укрепленных комплексными и неорганическими вяжущими и др.), возникающие при прогибе одежды напряжения под действием повторных кратковременных нагрузок, не должны в течение заданного срока службы приводить к образованию трещин от усталостного разрушения. Для этого должно быть обеспечено условие:

$$\sigma_r < \frac{R_N}{K_{np}^{mp}}, \quad (1.12)$$

где $K_{np}^{тр}$ – требуемый коэффициент прочности дорожной одежды по критерию упругого прогиба, принимаемый в зависимости от требуемого уровня надежности (см. табл. 1.1)\$

R_N – прочность материала слоя на растяжение при изгибе с учетом усталостных явлений;

σ_r – наибольшее растягивающее напряжение в рассматриваемом слое, устанавливаемое расчетом.

1.6.2. Наибольшее растягивающее напряжение σ_r при изгибе в монолитном слое определяют с помощью номограммы, приводя реальную конструкцию к двухслойной модели (рис. 1.1).

К верхнему слою модели относят все асфальтобетонные слои, включая рассчитываемый. Толщину верхнего слоя модели h_v принимают равной сумме толщин, входящих в пакет асфальтобетонных слоев ($\sum h_i$).

Значение модуля упругости верхнего слоя модели устанавливают как средневзвешенное для всего пакета асфальтобетонных слоев по формуле 1.9.

Нижним (полубесконечным) слоем модели служит часть конструкции, расположенная ниже пакета асфальтобетонных слоев, включая грунт рабочего слоя земляного полотна.

Модуль упругости нижнего слоя модели определяют путем приведения слоистой системы к эквивалентной по жесткости с помощью номограммы.

1.6.3. При использовании номограммы расчетное растягивающее напряжение определяют по формуле:

$$\overline{\sigma}_r = \sigma_r \cdot p \cdot \kappa_\sigma, \quad (1.13)$$

где σ_r – растягивающее напряжение от единичной нагрузки при расчетных диаметрах площадки, передающей нагрузку, определяемое по номограмме (рис. П.1.4);

κ_σ – коэффициент, учитывающий особенности напряженно-состояния покрытия конструкции под спаренным баллоном. Принимают равным 0,85 (при расчете на однобаллонное колесо $\kappa_\sigma = 1,00$);

p – расчетное давление, принимаемое по табл. 1.2.

1.6.4. Прочность материала монолитного слоя при многократном растяжении при изгибе определяют по формуле:

$$R_N = R_0 k_1 k_2 (1 - v_R \cdot t), \quad (1.14)$$

где R_0 – нормативное значение предельного сопротивления растяжению (прочность) при изгибе при расчетной низкой весенней температуре при однократном приложении нагрузки, принимаемое по табличным данным;

k_1 – коэффициент, учитывающий снижение прочности вследствие усталостных явлений при многократном приложении нагрузки;

k_2 – коэффициент, учитывающий снижение прочности во времени от воздействия погодно-климатических факторов (табл. 1.7);

v_R – коэффициент вариации прочности на растяжение;

t – коэффициент нормативного отклонения.

Таблица 1.7

	Материал расчетного слоя	k_2
	Асфальтобетон	
1	Высокоплотный	1,0
2	Плотный	
	I марки	0,95
	II марки	0,90
	III марки	0,80
3	Пористый и высокопористый	0,80
4	Органоминеральные смеси	0,8027

1.6.5. Коэффициент k_1 , отражающий влияние на прочность усталостных процессов, вычисляют по выражению:

$$k_1 = \frac{\alpha}{\sqrt[m]{\sum N_p}}, \quad (1.15)$$

где $\sum N_p$ – расчетное суммарное число приложений расчетной нагрузки за срок службы монолитного покрытия, определяемое по формуле (1.3) или (1.4) с учетом числа расчетных суток за срок службы;

m – показатель степени, зависящий от свойств материала рассчитываемого монолитного слоя;

α – коэффициент, учитывающий различие в реальном и лабораторном режимах растяжения повторной нагрузкой, а также вероятность совпадения во времени расчетной (низкой) температуры покрытия и расчетного состояния грунта рабочего слоя по влажности;

1.6.6. Расчеты на усталостную прочность выполняют в следующем порядке:

а) приводят конструкцию к двухслойной модели и определяют отношения $\frac{h_g}{D}, \frac{E_g}{E_{np}}$;

б) по полученным параметрам по номограмме находят значение $\overline{\sigma_r}$ и по формуле 1.13 вычисляют расчетное растягивающее напряжение;

с) вычисляют предельное растягивающее напряжение по формуле (1.15). В пакете асфальтобетонных слоев за предельное растягивающее напряжение R_N принимают значение, отвечающее материалу нижнего слоя асфальтобетонного пакета;

д) проверяют условие (1.12) и при необходимости корректируют конструкцию.

	Дорожная конструкция	Расчетная схема
Расчет на упругий прогиб		
Расчет на изгиб в монолитных а/б слоях		
Расчет на сдвиг в грунте и слабосвязных слоях основания		

Рисунок 1.1 – Расчетные схемы дорожных конструкций при расчете по трем критериям

Контрольные вопросы к части 1

1. Перечислите основные параметры расчетных нагрузок, используемых при проектировании и расчете дорожных одежд конструкций в соответствии с ОДН 218.04-01.

2. Какие используются критерии для расчета нежестких дорожных одежд на прочность конструкций в соответствии с ОДН 218.04-01?

3. В чем состоит процедура расчета дорожной конструкции по критерию упругого прогиба?

4. В чем состоит процедура расчета дорожной конструкции по критерию сдвига в грунте земляного полотна и слабосвязных слоях основания?

5. В чем состоит процедура расчета дорожной конструкции по критерию усталостного разрушения при изгибе в монолитных слоях?

6. Какие используются расчетные схемы при расчете дорожных конструкций в соответствии с ОДН 218.04-01?