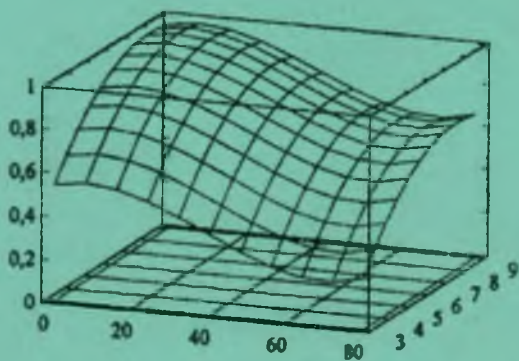


В.А.Веренько

НАДЕЖНОСТЬ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД



Минск
Белорусская государственная политехническая академия
2002

В.А.Веренько

**НАДЕЖНОСТЬ
ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД**

*Рекомендовано Научно-методическим центром учебной книги
и средств обучения Министерства образования Республики Беларусь
в качестве пособия для студентов специальности «Строительство
дорог и транспортных объектов» высших учебных заведений*

Минск
Белорусская государственная политехническая академия
2002

УДК 625.73-192(075.8)

ББК 39.311

В 31

Рецензенты:

докт. техн. наук, проф. В.Н.Яромко;
кафедра строительного производства
Полоцкого государственного университета

Веренько В.А.

В 31 Надежность дорожных одежд: Пособие / В.А.Веренько. – Мн.: БГПА, 2002. – 120 с.

ISBN 985-6529-39-5.

В пособии рассмотрены методы оценки и пути повышения надежности дорожных одежд. Приведен теоретический и экспериментальный материал, полученный автором в результате исследований.

Рассмотрены новые материалы и технологии, используемые при строительстве дорожных покрытий (асфальтобетоны на модифицированных битумах, бетоны на органигидравлических вяжущих и др.).

Пособие предназначено для студентов специальности «Строительство дорог и транспортных объектов», будет полезно также аспирантам и слушателям курсов повышения квалификации данного профиля.

УДК 625.73-192 (075.8)

ББК 39.311

ISBN 985-6529-39-5

© Веренько В.А., 2002

Введение

Динамика развития автомобильного транспорта такова, что ежегодно наблюдается прирост интенсивности движения, увеличение нагрузок на ось и массы транспортных средств. Так, если в 80-е годы на дорогах Республики Беларусь доля транспортных средств с нагрузкой на ось более 10 т составляла около 5,0 %, то в 90-е она достигла 30 %. Нагрузки на ось автопоездов достигают 13...15 тонн, а количество осей – 5 и более. Произошло существенное увеличение нагрузки на городские улицы и дороги. Грузоподъемность автобусов и троллейбусов достигла 30...40 тонн, а интервал движения в часы пик в ряде микрорайонов Минска, Гомеля, Витебска составляет менее 30 секунд. Такое положение приводит к быстрому разрушению материала покрытий и дорожных одежд в целом. Межремонтные сроки службы дорожных покрытий в городах составляют 2...3 года, за городом – 4...6 лет, что требует больших капитальных затрат.

Поэтому остро стоит вопрос разработки методов оценки и путей повышения надежности и долговечности дорожных покрытий и одежд в целом. К сожалению, действующие нормативные документы и стандарты практически не уделяют данному вопросу внимания.

Предлагаемое учебное пособие направлено, прежде всего, на ознакомление с проблемой надежности дорожных одежд, способами ее оценки и повышения. Достаточно подробно рассмотрен вопрос надежности материалов дорожных покрытий. Описаны мероприятия повышения надежности за счет применения новых конструктивных решений, материалов и технологий. Большинство представленных положений получены автором в результате длительных исследований.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности «Строительство дорог и транспортных объектов» и будет полезно также аспирантам и слушателям курсов повышения квалификации данного профиля.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

1.1. Критерии прочности дорожных одежд

Дорожная одежда (ДО) – многослойная конструкция, предназначенная для перераспределения и снижения давления на грунт от

действия транспортной нагрузки, при котором остаточные деформации отсутствуют или находятся в пределах допустимых.

По сопротивлению нагрузкам от транспортных средств и по характеру деформирования дорожные одежды делятся на две группы – жесткие и нежесткие.

Жесткая дорожная одежда работает как плита конечных размеров на упругом основании при свободном, шарнирном или ином способе соединения плит. К жестким относят ДО с цементобетонным покрытием, а также с асфальтобетонным покрытием на основании из цементобетона, расчлененного деформационными швами. Покрытия жестких дорожных одежд могут быть монолитными и сборными, армированными и неармированными, предварительно напряженными и струнобетонными. Основное отличие жестких дорожных одежд заключается в наличии деформационных швов, которые устраивают с целью предотвращения образования хаотических трещин.

Нежесткая дорожная одежда работает как слоистая система бесконечных в плане размеров со сплошным покрытием на упругом основании. К нежестким относят ДО с покрытием из материалов на органических вяжущих (асфальтобетон, дегтебетон), комплексных органических и гидравлических вяжущих (битумные эмульсии и цемент), а также с покрытием из зернистых материалов (щебень, гравий, шлаки).

Отличие между жесткими и нежесткими ДО заключается не только в методах расчета, но и в параметрах допустимых деформаций (прогибов) под колесом расчетного автомобиля. Поскольку соотношение между прочностью и модулем упругости материалов покрытия нежестких ДО значительно выше, чем жестких, толщина слоя покрытия нежестких ДО существенно ниже. Так, если в среднем толщина асфальтобетонного покрытия составляет 10...15 см, то цементобетонного – 20...26 см. Данный факт, а также лучшая ремонтоспособность покрытий нежестких дорожных одежд, привели к их значительно более широкому распространению (в РБ – более 90%).

Дорожные одежды рассчитывают на прочность с некоторым уровнем надежности.

Под *прочностью* понимают способность материалов или конструкций сопротивляться разрушению, а также необратимым измерениям формы под действием внешних нагрузок.

Применительно к дорожной одежде термин «прочность» можно трактовать как отсутствие силовых трещин, проломов, просадок, приводящих к разрушению дорожной одежды, а также появление деформаций, снижающих скорость и безопасность движения по дороге.

В РБ для нежесткой дорожной одежды приняты два критерия прочности на действие транспортной нагрузки:

1) *предельная относительная вертикальная деформация* (прогиб), при которой появляется нарушение монолитности и ровности покрытия;

2) *предел прочности на растяжение при изгибе монолитных слоев* (материалы на основе вяжущих), значение которого должно быть не ниже напряжения от действия транспортной нагрузки в расчетный период.

В странах СНГ применяют дополнительный критерий – предельное касательное напряжение в несвязных слоях дорожной одежды, превышение которого ведет к накоплению остаточных деформаций в данных слоях и потере ровности покрытия. С учетом состояния ровности дорожных покрытий РБ использование данного критерия следует признать целесообразным.

Кроме критериев прочности на действие транспортной нагрузки проверяют устойчивость дорожной одежды на действие погодно – климатических факторов, – в частности, на морозоустойчивость. Критерием морозостойкости является предельно допустимая вертикальная деформация грунта земляного полотна в период избыточного увлажнения (весна, осень). Величина данной деформации зависит от типа покрытия дорожной одежды.

Рассмотрим данные критерии более подробно.

Расчет на упругий прогиб заключается в проверке условия прочности

$$E_{общ} \geq E_{тр} K_{пр}, \quad (1.1)$$

где $E_{общ}$ – общий эквивалентный модуль упругости на покрытие дорожной одежды;

$E_{тр}$ – требуемый модуль упругости дорожной одежды;

$K_{пр}$ – коэффициент прочности, учитывающий заданный уровень надежности.

Общий эквивалентный модуль упругости вычисляют путем последовательного расчета двухслойных систем [1]. Требуемый модуль зависит от интенсивности движения расчетных автомобилей и степени капитальности покрытия дорожной одежды:

$$E_{mp} = a + b \lg N_p, \quad (1.2)$$

где a и b – коэффициенты, учитывающие степень капитальности покрытия;

N_p – интенсивность движения расчетных автомобилей на одну полосу в сутки.

Расчет на сплошность монолитных слоев. Предельно допустимый прогиб покрытия и общий требуемый модуль упругости по формулам (1.1) и (1.2) являются скорее обобщенными показателями долговременной прочности и работоспособности дорожной одежды. Выполнение условия (1.1) еще не гарантирует от появления трещин в монолитных слоях дорожной одежды при изгибе ее расчетной нагрузкой, так как при назначении требуемого модуля упругости детализация условий работы этих слоев не проведена. Поэтому для обеспечения сплошности монолитных слоев дорожной одежды вводится второй критерий прочности в виде

$$\sigma_r \leq R_{pu}, \quad (1.3)$$

где σ_r – наибольшее растягивающее напряжение в материалах слоя;

R_{pu} – предельно допустимое растягивающее напряжение материала слоя с учетом явлений усталости, неоднородности, старения.

По исследованиям М.Б.Корсунского, наибольшие растягивающие напряжения в монолитном покрытии толщиной h_1 с модулем упругости E_1 при возможности свободного перемещения слоя h_1 по основанию равны (рис. 1.1):

$$\sigma_r = \frac{4k_d p h_1 E_1}{\pi D E_{\text{общ}}} \left(1 - \frac{2}{\pi} \arctg \frac{h_3}{D}\right) \arctg^2 \frac{D}{h_3}, \quad (1.4)$$

где p – удельное давление от расчетного автомобиля;

$k_d = 1,15 \dots 1,3$ – коэффициент запаса на динамичность воздействия нагрузки и неоднородность условий работы;

$$h_э = 1,1h_1 = \sqrt{\frac{E_1}{E_{общ}}} \text{ – эквивалентная толщина покрытия;}$$

$E_{общ}$ – общий модуль упругости части дорожной одежды, расположенной ниже покрытия.

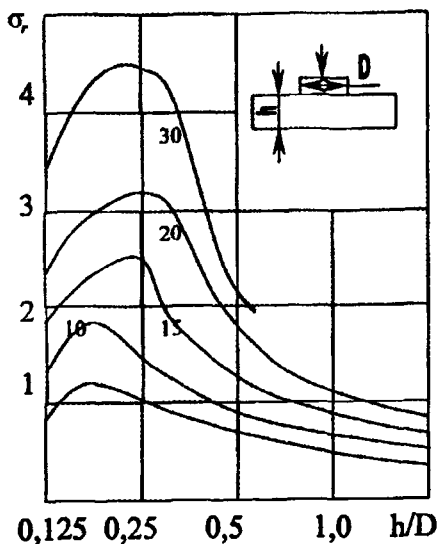


Рис. 1.1. Зависимость напряжения от относительной толщины слоя (цифры на кривых – отношение модуля упругости слоя к модулю упругости основания)

При совместной работе верхнего и нижнего слоев величина максимальных растягивающих напряжений снижается, что указывает на важность обеспечения хорошего сцепления покрытия с основанием, особенно при толщине покрытия менее $0,25D$ (порядка 8...9 см).

Для облегчения вычисления напряжений растяжения в покрытии применяется номограмма (представленная в нормативных документах, – например ВСН 46-83), дающая значения максимальных удель-

ных растягивающих напряжений $\bar{\sigma}_r$ (от нагрузки с давлением на покрытие, равным единице).

Действующие напряжения при удельном давлении от расчетной нагрузки определяются по формуле

$$\sigma_r = 1,15 p \bar{\sigma}_r. \quad (1.5)$$

При двухслойном покрытии для вычисления σ_r по формуле (1.4) в нижнем слое покрытия толщину h принимают как сумму толщин верхнего и нижнего слоев и средний модуль упругости двухслойного покрытия:

$$E_{cp} = \frac{E_1 h_1 + E_2 h_2}{h_1 + h_2}, \quad (1.6)$$

где E_1, E_2 – модули упругости верхнего и нижнего слоя покрытия.

В качестве модуля упругости полупространства, подстилающего нижний слой, применяют общий эквивалентный модуль на поверхности верхнего слоя основания.

При невыполнении условия прочности (1.3) повышают жесткость основания путем увеличения толщины наиболее дешевых слоев, увеличивают толщину самого слоя, прочность которого не обеспечена, либо снижают его жесткость (увеличение количества битума, применение битумополимерных вяжущих). Возможны и специальные конструктивные мероприятия: устройство прослоек из гсоткстиля, армирование материалов, замена материалов конструктивных слоев на более прочные и жесткие.

Расчет на сдвигоустойчивость состоит в проверке условия

$$T \leq T_{дон} K_{np}, \quad (1.7)$$

где T – активное напряжение сдвига в конструктивном слое, вызванное действием транспортной нагрузки и весом слоев дорожной одежды;

$T_{дон}$ – допустимое напряжение, зависящее от прочностных свойств материала;

K_{np} – коэффициент прочности.

Активное напряжение сдвига определяют по условию

$$T = \tau_n + \tau_\sigma, \quad (1.8)$$

где τ_n – активное напряжение от временной нагрузки;

τ_σ – то же от собственного веса дорожной одежды.

Активное напряжение сдвига в грунте от временной нагрузки

$$\tau_n = [(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi] / (2 \cos \varphi), \quad (1.9)$$

где φ – угол внутреннего трения грунта;

σ_1 – максимальное главное напряжение;

σ_3 – минимальное главное напряжение (полагают, что $\sigma_1 \geq \sigma_3 = \sigma_2$).

Главные напряжения σ_1 и σ_3 надо вычислять на основе теории упругости для слоистых сред. Поскольку применение в этих целях формул для многослойных сред требует большого объема трудоемких вычислений, реальную многослойную дорожную конструкцию можно приводить к двухслойной расчетной модели (см. эквивалентный модуль упругости), в которой нижним слоем служит подстилающий грунт, а верхний слой имеет толщину, равную сумме толщин слоев дорожной одежды. Средний модуль упругости всей дорожной одежды (рис. 1.2)

$$E_{cp} = \sum_{i=1}^n E_i h_i / \sum_{i=1}^n h_i, \quad (1.10)$$

где n – число слоев дорожной одежды;

E_i – модуль упругости i -го слоя;

h_i – толщина i -го слоя.

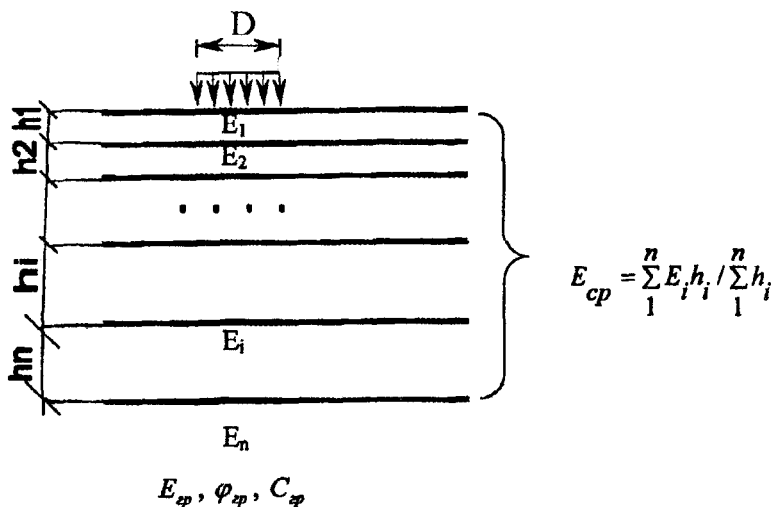


Рис. 1.2. Схема приведения многослойной конструкции к двухслойной при расчете грунта земляного полотна по сдвигу

После приведения многослойной реальной конструкции к двухслойной модели вычисляется $\bar{\tau}_n$ (от единичной нагрузки) по номограммам, приведенным в нормативных документах (например, ВСН 46-83) [1].

Активное напряжение сдвига τ_a в грунте от собственного веса дорожной одежды также находят по номограмме в зависимости от общей толщины $\sum_{i=1}^n h_i$ дорожной одежды и угла φ_{cp} внутреннего трения грунта.

Допустимое напряжение $T_{дон}$ вычисляют по формуле

$$T_{дон} = Ck_1k_2k_3, \text{ МПа}, \quad (1.11)$$

где C – коэффициент удельного сцепления материала слоя (или грунта), МПа;

k_1 – безразмерный коэффициент, учитывающий тиксотропные свойства грунтов (снижение прочности от вибрационных воздействий);

k_2 – безразмерный коэффициент неоднородности свойств грунтов;

k_3 – безразмерный коэффициент условий работы, учитывающий явления дилатансии (увеличения объема при деформировании), зацепления частиц и т.д.

При невыполнении условия (1.7) увеличивают толщину слоев, расположенных выше рассматриваемого слоя, или повышают их жесткость (модуль упругости).

В РБ расчет на сдвигоустойчивость не проводится, что не совсем оправданно с точки зрения надежности и долговечности дорожной одежды. В частности, расчет на сдвигоустойчивость предполагает исключение остаточных деформаций в грунтах земляного полотна и слабосвязных слоях дорожной одежды. Появление подобных деформаций приводит к появлению неровностей покрытия дорожной одежды. Учитывая, что в РБ около 40% дорог (по данным Белдорцентра) имеют недостаточный уровень ровности, данный критерий целесообразен и для условий РБ (возможно, с определенными уточнениями).

Расчет жестких дорожных одежд на действие транспортной нагрузки ведут *по трем критериям прочности*:

1. Напряжения в цементобетонной плите, возникающие от расчетной транспортной нагрузки, не должны превышать прочности бетона на изгиб с учетом явлений усталости, неоднородности, условий работы и т.д.

2. Активные напряжения сдвига в слабосвязных слоях основания и грунте земляного полотна не должны превышать допустимых напряжений сдвига для данных материалов.

3. Упругий прогиб, возникающий под колесом автомобиля в расчетный период, не должен превышать допустимый.

Расчет жесткой дорожной одежды ведут в следующей последовательности:

1. Назначают расчетные характеристики грунта и материалов конструктивных слоев.

2. Определяют требуемую толщину дорожной одежды из условия морозозащиты.

3. Назначают толщину подстилающего слоя из условия дренирования и морозозащиты, а также слоя основания (конструктивно).

4. Расчетом определяют эквивалентный модуль упругости на поверхности основания (см. эквивалентный модуль упругости). При

этом расчетный диаметр отпечатка следа колеса увеличивают на предполагаемую толщину бетонной плиты.

5. С помощью коэффициентов приведения реальные автомобили приводят к расчетному и вычисляют суточную интенсивность расчетных автомобилей на одну полосу движения (N_p).

6. Вычисляют суммарное количество воздействий расчетного автомобиля на покрытие за весь срок службы дорожной одежды:

$$N = 365 \sum_{i=1}^{t_p} N_p (1 + q)t_i, \quad (1.12)$$

где t_p – расчетный срок службы покрытия до капитального ремонта;

q – ежегодный прирост интенсивности движения в долях единицы.

7. Вычисляют расчетное значение коэффициента усталости:

$$K_y = 1,08(N)^{0,063}. \quad (1.13)$$

8. Задают три толщины цементобетонной плиты (h_1, h_2, h_3) и для данных толщин вычисляют значения коэффициентов ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$):

$$\alpha_i = 0,3552 - 1,28495 \lg D / 2L_i, \quad (1.14)$$

где D – диаметр отпечатка следа колеса расчетного автомобиля;

L – упругая характеристика плиты,

$$L_i = h_i \cdot 3 \sqrt{\frac{E_b \cdot (1 - \mu_o^2)}{6 \cdot (1 - \mu_b^2) \cdot E_{осн}}}, \quad (1.15)$$

где E_b – модуль упругости цементобетона;

$E_{осн}$ – эквивалентный модуль на поверхности основания;

μ_o и μ_b – коэффициенты Пуассона основания и цементобетона соответственно.

9. Определяют величины коэффициентов усталости, полагая, что напряжения в бетонной плите равны допустимым:

$$K_{y_i} = \frac{\alpha_i P}{(h_i)^2 k_{\sigma i} k_{\sigma} R_p}, \quad (1.16)$$

где $k_{\sigma i}$ – коэффициент условий работы бетона, учитывающий влияние температурных напряжений, возникающих вследствие перепада температуры по толщине плиты и зависящий от района строительства и толщины плиты (чем больше толщина плиты, тем меньше коэффициент);

k_{σ} – коэффициент, учитывающий рост прочности бетона во времени;

R_p – прочность бетона на изгиб;

P – нагрузка на колесо расчетного автомобиля.

10. Строят график зависимости коэффициента усталости от толщины плиты.

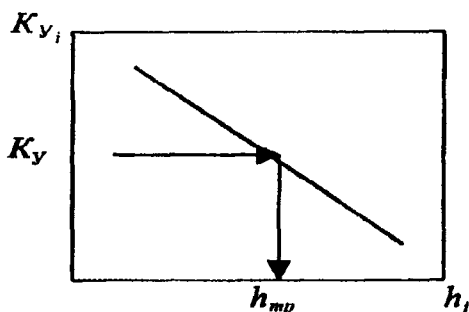


Рис. 1.3. Зависимость коэффициента усталости от толщины плиты

Используя данный график, находят толщину плиты, соответствующую фактическому коэффициенту усталости, вычисленному по (1.13).

Второе условие прочности проверяют путем сопоставления среднего критического давления ($P_{кр}$), при котором в грунте или слоях основания отсутствуют зоны сдвигов, со средним реактивным давлением, возникающим под плитой от расчетного автомобиля.

Для жесткой и нежесткой дорожной одежды при неблагоприятных грунтово-гидрологических условиях (переувлажнение грунтов земляного полотна, их низкий коэффициент фильтрации) дополнительно вводят критерий прочности – *предельная допускаемая вертикальная деформация пучения грунта земляного полотна*, при превышении которой ухудшается ровность или в покрытии появляются трещины (критерий морозоустойчивости дорожной одежды). Проверку морозостойкости выполняют по методике [1].

Проверку прочности дорожной одежды производят применительно к условиям определенного периода эксплуатации, называемого расчетным.

Расчетный период (РП) – временной интервал, на протяжении которого производится расчет дорожной конструкции на прочность и надежность. Для жесткой дорожной одежды РП считается равным ее расчетному сроку службы; для нежесткой РП составляет 4...10 суток при наибольшей влажности грунта земляного полотна, когда прочность грунта минимальна и вертикальные деформации (прогиб) имеют максимальное значение (данный период наблюдается один раз за весь срок службы: его обычно относят на последний год эксплуатации перед капитальным ремонтом). Такой подход является не совсем правильным, поскольку не учитывает накопление повреждаемости и рекомбинацию структуры за период, предшествующий расчетному. Однако с учетом большой сложности перехода к расчетам дорожных одежд на весь период эксплуатации (по накопленным осям) подобный подход пока не используется на практике [1].

Каждый из критериев прочности нежесткой дорожной одежды имеет свои температурно-временные параметры. Например, для условий РБ расчет на упругий прогиб ведут при температуре $+10^{\circ}\text{C}$, а на сплошность монолитных слоев – при 0°C . Время действия нагрузки принимают 0,1 с. Конкретные цифровые значения критериев для стран СНГ можно получить по [1].

Выполнение вышеуказанных критериев прочности еще не гарантирует обеспечения нормативных сроков службы в эксплуатации. На практике неизбежны колебания свойств материалов, грунтов, толщины слоев по всей площади дорожной одежды, связанные с технологическими, проектными и строительными нарушениями. Поэтому расчет на прочность ведут с определенным запасом, называемым *уровнем надежности*.

1.2. Основные понятия о надежности дорожных одежд

Надежность дорожной одежды – это способность дорожной конструкции в целом сохранять заданные эксплуатационные характеристики (ровность, прочность, шероховатость) в течение расчетного срока службы.

Интегральной характеристикой надежности ДО является **уровень надежности**, характеризующий вероятность ее отказа (появление недопустимых деформаций, разрушение) ранее расчетного срока службы.

Уровень надежности (УН) – это вероятность отказа покрытия или дорожной конструкции по одному (частный уровень) или ряду (общий уровень) критериев прочности. Значение уровня надежности P можно трактовать следующим образом:

$$P = 1 - F_p / F_o, \quad (1.17)$$

где F_p – площадь покрытия дорожной одежды, имеющая недопустимые деформации или разрушения на конец срока службы;

F_o – общая площадь дорожной одежды.

Таким образом, если уровень надежности равен 0,9 (90%), то в конце расчетного срока службы 10% покрытия будет находиться в неудовлетворительном состоянии.

Вычислить уровень надежности можно путем определения интеграла:

$$P = \int_{E_{дон}}^{E_{max}} F_E dE, \quad (1.18)$$

где $E_{дон}$ – допустимое значение параметра (модуля упругости, прочности), по которому оценивается УН;

E_{max} – максимальное значение параметра, встречающееся на практике;

F_E – функция распределения параметра.

Функция распределения параметра может быть представлена в виде теоретической кривой (нормального распределения, Вейбулла, Пирсона и т.д.) либо получена экспериментально.

Например, для нормального распределения (наиболее часто встречающегося) функция распределения имеет вид

$$F_E = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(E_i - m_E)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1.19)$$

где E_i – текущее значение параметра E ;

m_E – его математическое ожидание;

σ^2 – дисперсия параметра E .

Вычислить уровень надежности можно также на основе анализа экспериментальной кривой распределения (рис. 1.4).

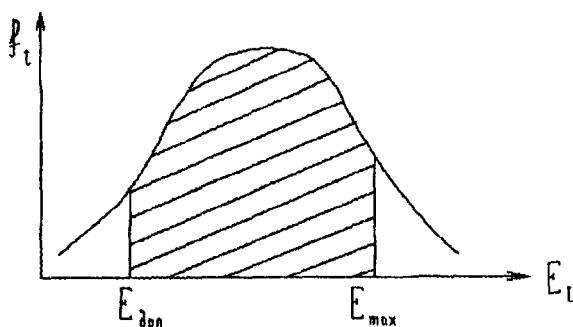


Рис. 1.4. Функция распределения параметра E
(площадь заштрихованной области – уровень надежности)

Если получена экспериментальная кривая распределения заданного параметра (например, модуля упругости), то для оценки уровня надежности достаточно определить площадь под кривой в пределах от допустимого до максимального параметра. В этом случае для оценки УН необходимо произвести ряд экспериментальных замеров параметра E , статистическую обработку, определить функцию распределения и вычислить интеграл надежности.

При анализе и оценке надежности большое значение имеет обоснование допустимых параметров, входящих в формулу (1.18).

Допустимые параметры могут быть получены теоретически и экспериментально.

Теоретически допустимые параметры определяют путем вычисления определенными методами параметров предельного состояния материала или конструкции (например, путем расчета напряженно-деформированного состояния дорожной одежды можно определить величину напряжения, которое и будет определять допустимое значение предела прочности на изгиб, сдвиг и т.д.).

Однако определить допустимые параметры теоретически не всегда возможно ввиду большого количества факторов, влияющих на надежность дорожной одежды (например, модуль упругости, расчетные прогибы и т.д.).

В этом случае прибегают к *вероятностно-статистическим методам* определения допустимых параметров. Для расчета отбирают участки дорожной одежды с близкими климатическими условиями, интенсивностью движения, конструкцией. На данных участках, в свою очередь, выделяют места в удовлетворительном (например, по ровности) и неудовлетворительном состояниях. Для данных мест экспериментально определяют параметры прочности (например, модуль упругости). Полученные данные подвергают статистической обработке и строят кривые распределения (рис. 1.5).

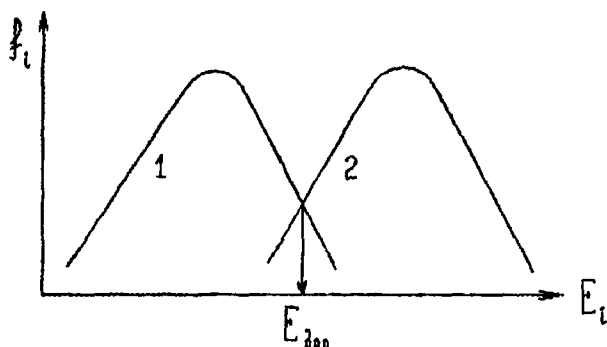


Рис. 1.5. Кривые распределения параметра E_i :
1 — непрочные участки; 2 — прочные участки

Точка пересечения кривых распределения для прочных и непрочных участков дает характеристику, обеспечивающую одинаковую вероятность попадания свойств в удовлетворительное и не-

удовлетворительное состояние. Данная характеристика и принимается за допустимую ($E_{\text{дон}}$).

С целью учета разброса свойств и ввода в допустимую характеристику определенного запаса (надежности) используют классические подходы теории вероятностей.

$$E_{mp} = E_{\text{дон}}(1 + tK_g), \quad (1.20)$$

где t – коэффициент нормированного отклонения, принимаемый в зависимости от требуемой точности результата и числа замеров;

K_g – коэффициент вариации свойств исследуемой характеристики.

Различают частные и общий уровни надежности.

Частный уровень надежности – это уровень надежности по какому-либо одному критерию прочности (упругому прогибу, устойчивости к пластическим деформациям и т.д.). Используя частный уровень надежности, можно предсказать вероятность отказа материала или конструкции только по данному критерию. Отказ частного уровня свидетельствует о необходимости среднего ремонта.

Общий уровень надежности – это уровень надежности, учитывающий весь комплекс возможных воздействий. Обычно общий уровень надежности получают путем произведения частных уровней. Если общий уровень надежности ниже нормативного, снижается срок службы дорожной одежды.

1.3. Взаимосвязь коэффициента запаса прочности и уровня надежности

Если известны свойства материала, характеризующие его поведение в дорожной одежде, и требования к этим свойствам, то можно определить коэффициент запаса K_i :

$$K_i = R_i^{\phi} / R_i^{mp}, \quad (1.21)$$

где R_i^{ϕ} , R_i^{mp} – соответственно фактические и требуемые свойства материала.

Чтобы использовать значение коэффициентов запаса при оценке надежности, необходимо установить их связь с уровнем надежности, поскольку в реальной ситуации неизбежен статистический разброс.

Уровень надежности можно найти как вероятность того, что коэффициент запаса K будет меньше значения K_i , вычисленного по формуле (1.21).

Установить связь коэффициентов запаса и уровня надежности можно экспериментально путем строительства опытных участков дорожных одежд (или покрытий с различными свойствами), обладающих различными коэффициентами запаса с последующим долговременным наблюдением за развитием деформаций и определением уровня надежности по формуле (1.18). Затем полученные данные подвергают статистической обработке и получают зависимости связи коэффициентов запаса и уровня надежности. Таким образом была получена зависимость частного уровня надежности дорожной одежды по упругому прогибу от коэффициента прочности, определяемого следующим образом [1]:

$$K_{np} = E_{\phi} / E_{mp}, \quad (1.22)$$

где E_{ϕ} – фактический модуль упругости;

E_{mp} – требуемый модуль упругости, определяемый по формуле (1.2) или (1.20).

Вид зависимости уровня надежности от коэффициента прочности представлен на рис. 1.6.

Однако получить подобные зависимости для ряда других частных уровней надежности пока не удалось ввиду большой трудоемкости и длительности подобных экспериментов. Поэтому на данном этапе можно воспользоваться теоретическими подходами.

Для нормального закона распределения, которому подчиняется большинство свойств материалов и конструкций, уровень надежности можно определить из условия

$$P = \int_{-\infty}^{K_i} f(K) dK = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{K_i} \exp\left[-\frac{(K_i - \bar{K})^2}{2\sigma^2}\right] dK, \quad (1.23)$$

где K_i – фактическое значение коэффициента запаса;
 \bar{K} – среднее значение.

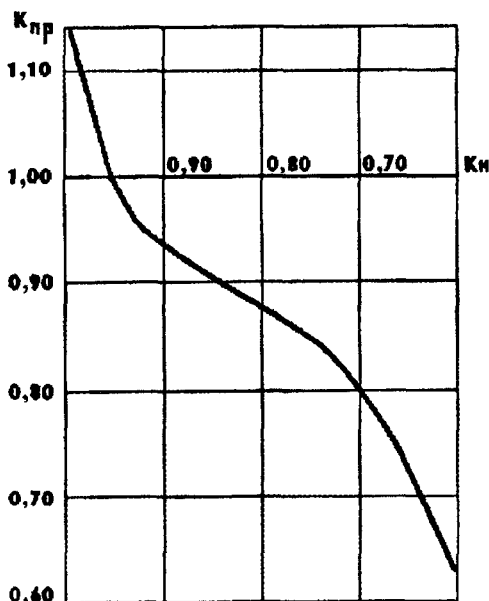


Рис. 1.6. Зависимость уровня надежности дорожной одежды по упругому прогибу от коэффициента прочности

Обозначим

$$Z = \frac{K - \bar{K}}{\sigma}.$$

Тогда

$$K = \sigma Z + \bar{K}; \quad dK = \sigma dZ;$$

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\frac{K_i - \bar{K}}{\sigma}} e^{-Z^2/2} dZ = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-Z^2/2} dZ + \\
 &+ \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{K_i - \bar{K}}{\sigma}} e^{-Z^2/2} dZ = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{K_i - \bar{K}}{\sigma}\right),
 \end{aligned} \tag{1.24}$$

где Φ – функционал Лапласа.

Следовательно, уровень надежности при известном коэффициенте запаса K_i можно вычислить из условия

$$P = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{K_i - \bar{K}}{\sigma}\right). \quad (1.25)$$

Если принять значение среднеквадратического отклонения равным $0,15 \dots 0,3$, а $\bar{K} = 1$, уровень P можно определить по рис. 1.7.

Используя вышеприведенные подходы, можно получить взаимосвязь коэффициентов запаса и уровней надежности для других видов кривых распределения (Вейбулла, Пирсона и т.д.). Более подробно данный вопрос освещен в разд. 4.

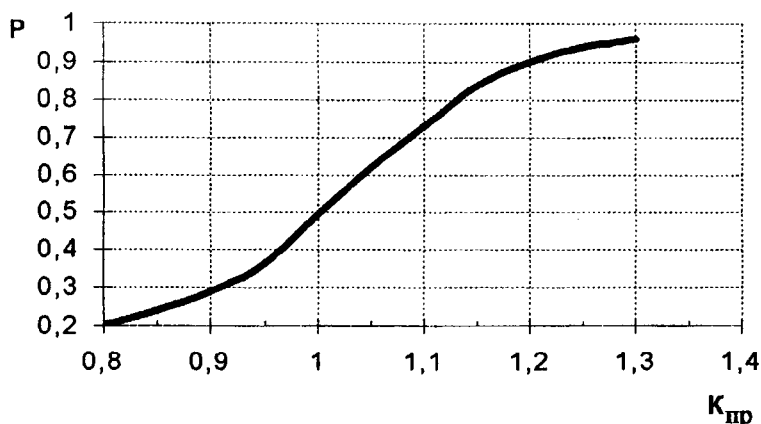


Рис. 1.7. Зависимость уровня надежности от коэффициента прочности при нормальном законе распределения

Поскольку для реального материала определяется N значений K_i , необходимо для каждого из них вычислить P_i , а общий уровень надежности найти как произведение частных уровней:

$$P_0 = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_N. \quad (1.26)$$

Согласно [2], более объективная картина может быть получена при определении P_0 .

$$P_0 = \sqrt[N]{P_1 \cdot P_2 \dots P_N} . \quad (1.27)$$

Чем выше значение P_0 , тем выше надежность и срок службы дорожной одежды.

Как уже отмечалось выше, в настоящее время на основе наблюдений за состоянием дорожной одежды получена зависимость коэффициента прочности по модулю упругости и уровня надежности дорожной одежды, вид которой подобен кривой, представленной на рис. 1.7. Однако абсолютные значения величин отличаются (см. рис. 1.6), что связано с отклонением среднего значения коэффициента запаса эксплуатируемых дорожных одежд от единицы в большую сторону и более высокими коэффициентами вариации.

2. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

2.1. Надежность дорожных одежд на стадии проекта

Для оценки надежности дорожной одежды на стадии проекта необходимо вычислить частные уровни надежности по вышеуказанным критериям прочности (см. разд. 1), а затем оценить общий уровень надежности.

Коэффициенты запаса по критериям прочности определяют следующим образом:

1. Коэффициент запаса по упругому прогибу

$$K_E = E_\phi / E_{mp} , \quad (2.1)$$

где E_ϕ – фактический модуль упругости на покрытии дорожной одежды, принятый по проекту;

E_{mp} – требуемый модуль, полученный по зависимости (1.2).

2. Коэффициент запаса по второму критерию прочности (сплошность монолитных слоев)

$$K_R = R_u / \sigma_p , \quad (2.2)$$

где R_u – прочность материала на изгиб;

σ_p – напряжение в материале от действия транспортной нагрузки.

3. Коэффициент запаса по третьему критерию прочности (сдвигоустойчивость слабосвязных слоев и грунта)

$$K_c = K \cdot c / (\tau_a + \tau_d), \quad (2.3)$$

где K – коэффициент условий работы, определяемый по [1];

c – коэффициент удельного сцепления материала слоя;

$(\tau_a + \tau_d)$ – напряжения сдвига от действия транспортной нагрузки и веса дорожной одежды.

Одним из важных моментов на стадии проекта является выбор значения проектного уровня надежности.

Чем выше общий уровень надежности, тем дольше срок службы до капитального ремонта, меньше затрат на эксплуатацию дорожной одежды и эксплуатацию транспорта (более высокие эксплуатационные показатели). Однако при этом возрастают единовременные затраты на строительство дорожной одежды. Поэтому выбор требуемого уровня надежности является классической экономической задачей.

Срок службы дорожной одежды можно определить по формуле

$$T = T_n (P_{тр} / P_n)^M, \quad (2.4)$$

где $P_{тр}$ и P_n – требуемый уровень надежности и уровень, при котором обеспечивается нормативный срок службы;

M – показатель, зависящий от типа дорожной одежды.

Для оценки уровня надежности жесткой дорожной одежды необходимо определить фактические K_ϕ и требуемые $K_{тр}$ коэффициенты усталости по формулам (1.13) и (1.16), а затем вычислить коэффициент запаса по условию

$$K_s = K_\phi / K_{тр}. \quad (2.5)$$

2.2. Технологическая (строительная) надежность дорожных одежд

Заложенный на стадии проекта уровень надежности не всегда может быть реализован на практике в силу ряда технологических, материаловедческих, организационных проблем.

Перед сдачей дорожной одежды в эксплуатацию необходимо проверить уровень ее надежности с целью уточнения реальных сроков службы и распределения финансовых средств при необходимости коррекции сроков проведения ремонта.

Уровень надежности дорожной одежды можно оценить двумя способами:

1) расчетным путем через определение характеристик материалов конструктивных слоев с последующим расчетом коэффициентов запаса и уровня надежности по методике, излож. в 2.1;

2) экспериментальным путем посредством измерения прочности дорожной одежды и оценки уровня надежности.

Расчетные характеристики (РХ) – это характеристики материалов конструктивных слоев дорожных одежд, используемых при их расчете на прочность и надежность.

Различают РХ прочностные и деформационные.

Для монолитных материалов (содержащих вяжущее) к расчетным характеристикам относят модуль упругости (деформационную характеристику) и предел прочности на растяжение при изгибе (прочностную характеристику); для слабосвязных материалов (щебень, гравийно-песчаные смеси, грунты) – модуль упругости (деформационную характеристику), угол внутреннего трения и коэффициент удельного сцепления (прочностные характеристики). РХ определяют при расчетном времени действия нагрузки, при температурах и вязкости, соответствующих расчетному периоду.

Определение расчетных характеристик материалов и их контроль – важнейшие практические проблемы. К сожалению, в настоящее время контроль РХ, особенно при приемке объекта в эксплуатацию, практически не производится, что связано с необходимостью наличия сложного оборудования и квалифицированных кадров. В БГПА разработана упрощенная методика определения РХ, позволяющая существенно снизить затраты времени и использовать стандартное оборудование.

Определение РХ монолитных материалов ведут в следующей последовательности:

1. Определяют прочность образцов – цилиндров при расчетной температуре и скорости деформации 3 мм/мин (R).

2. Вычисляют значение предельной структурной прочности (R_c) по формуле

$$R_c = \frac{\bar{R}}{1 + 1,92 \lg\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}, \quad (2.6)$$

где R_1 и R_2 – прочность на растяжение при -15°C со скоростью 3 и 10 мм/мин соответственно;

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2}{2}. \quad (2.7)$$

3. Вычисляют прочность материала при расчетной скорости деформации и напряженном состоянии изгиба (R_u):

$$R_u = \frac{2,5 R}{0,431 + R/R_c}. \quad (2.8)$$

4. Вычисляют значение максимального модуля упругости (E_c):

$$E_c = 1,2(10 R_c)^{1,9}. \quad (2.9)$$

5. Вычисляют значения модулей упругости при расчетных температурах (E):

$$\left(\frac{E}{E_c}\right)^m = \frac{R}{R_c}, \quad (2.10)$$

где m – параметр, учитывающий структуру материала (для асфальтобетона 0,8).

Такой подход удобен в случае капремонта или реконструкции, когда используются, в основном, монолитные материалы.

В случае строительства многослойной дорожной одежды определение расчетных характеристик становится достаточно трудоемкой задачей. Тогда целесообразно использовать экспериментальные методы фактического определения модуля упругости дорожной одежды путем непосредственного измерения одним из способов: прогибометром, штампом, методом динамического нагружения и т.д. [1]. На основе проведенных замеров фиксируют модули упругости, строят кривую распределения и вычисляют уровень надежности как площадь кривой между допустимым (см. формулу (1.18)) и максимальным фактическим модулем.

2.3. Эксплуатационная надежность дорожных одежд

В процессе эксплуатации в структуре монолитных материалов дорожной одежды происходит накопление повреждаемости и снижение работоспособности.

Повреждаемость – накопление дефектов в структуре материала конструктивного слоя дорожной одежды в процессе ее эксплуатации, ведущих при определенном их объеме к недопустимым деформациям или разрушению. Вначале дефекты накапливаются на микроуровне, затем объединяются и приводят к макроразрушениям.

Количественной характеристикой повреждаемости является *уровень повреждаемости*. Характерно, что зафиксировать его путем измерения модуля невозможно. В результате возникает ситуация, когда при одинаковом прогибе дорожной одежды (модуле) в одном случае покрытия нужно ремонтировать через 2 года, во втором – через 6 лет.

Таким образом, для получения объективных результатов при измерении прочности эксплуатируемой дорожной одежды обязательно необходима оценка качества имеющихся материалов (хотя бы в основных связующих точках) и определение фактического модуля. Следует также оценить имеющийся уровень повреждаемости материала покрытия с целью правильного назначения сроков ремонта и расчета слоев усиления. Для этого необходимо выполнить ряд фундаментальных и прикладных исследований.

2.3.1. Общие вопросы теории кинетики накопления повреждаемости в структуре материалов дорожных покрытий

Кинетика накопления повреждаемости зависит от температуры, уровня и времени действия напряжения, режима его приложения, структурных особенностей материала. Такое положение приводит к необходимости составления и решения сложных кинетических уравнений, которые необходимо определить экспериментально, что существенно усложняет инженерные расчеты.

Оценку изменения свойств материала и уровня достигнутой повреждаемости можно проводить с помощью некоторого скаляра Ψ , определяемого из формулы

$$\Psi = \frac{R_t}{R_0}, \quad (2.11)$$

где R_t – свойства материалов в процессе механического воздействия;
 R_0 – исходные свойства.

Когда $\Psi = 1$, повреждения в структуре материала отсутствуют; когда $\Psi \rightarrow 0$, происходит разрушение.

На практике для определения уровня повреждаемости можно воспользоваться отношением фактических прочностей к исходным (модулей деформации, скоростей прохождения ультразвука, изменения радишума).

Установлено, что процесс накопления повреждаемости зависит от состава материала, температуры и режима приложения нагрузки. При этом кривая накопления повреждаемости может быть одинаковой для разных механических воздействий, т.е. одинаковый уровень Ψ может быть достигнут после определенного числа циклов приложения нагрузки или уровня деформации ползучести и т.д. Характерной особенностью бетонов является наличие значительного упрочнения структуры, на котором $\Psi > 1$. Появление упрочнения под действием механических нагрузок обусловлено ориентацией цепей макромолекул в направлении действия нагрузки, а также выравниванием поля напряжений.

Процесс накопления повреждаемости проходит в три стадии. *На первой стадии* наблюдается выравнивание поля напряжений за счет

деформации вязких связей и ориентации кластеров вторичной структуры в направлении механического воздействия, а также разрушение наиболее слабых связей. Процессы упрочнения преобладают над процессами разрушения, и прочность материала увеличивается. *На второй стадии* завершается ориентация агрегатов вторичной структуры в направлении воздействия, процесс разрушения преобладает над упрочнением, прочность материала начинает снижаться. *Третья стадия* характеризуется интенсивным разрушением структуры, формированием магистральных трещин и резким падением прочности.

Процесс накопления повреждаемости в структуре материала всегда связан с рассеянием энергии по причине того, что эта структура объединяет упругие и вязкие связи. Разрыв упругой связи вызывает перераспределение напряжений и увеличение деформации вязких связей, рассеивающих энергию. Деформации вязких связей ведут практически к полному рассеянию энергии. Чем большее количество энергии рассеяно структурой материала, тем выше уровень повреждаемости. Данный факт подтверждается экспериментально. Оказалось, что количество рассеянной энергии, определяемое как разность площадей между кривой нагружения и разгрузки, зависит от уровня Ψ . Такое положение позволяет получить функцию параметра Ψ от инвариантного критерия, не зависящего от условий нагружения.

Если известно значение предельного количества энергии, которое может рассеять материал W_{np} , то можно получить уравнение, связывающее параметр Ψ и приведенное количество рассеянной энергии W/W_{np} по эмпирической формуле

$$\Psi = \left(1 - W/W_{np}\right)^{KW/KW_{np} - A}, \quad (2.12)$$

где K и A – коэффициенты, однозначно зависящие от количества вовлеченных в процесс деформирования связей n .

Показатель $(1 - W/W_{np})$ характеризует остаточный ресурс работы материала и будет именоваться в дальнейшем *уровнем работоспособности* (F).

Предельный уровень Ψ_{np} теоретически равен нулю. Однако на практике разрушение наступает значительно раньше, что обусловлено интенсивным объединением на определенной стадии микротрещин и лавинообразным формированием магистральных трещин.

Задачу по отысканию Ψ_{np} можно свести к задаче теории перколяции по связям. Для пространственной кубической решетки перколяционный порог по связям составит 0,25. Следовательно, Ψ_{np} можно принять равной 0,75.

Вместо соотношения W/W_{np} можно ввести соотношение фактического и предельного сроков службы материала дорожного покрытия. В результате уравнение (2.12) примет вид

$$\Psi = \left(1 - \frac{T_o}{T_{np}} \right)^k \frac{T_o}{T_{np}} - A \quad (2.13)$$

где T_o – срок службы дорожной одежды на момент испытания;
 k и A – коэффициенты, равные 1,8 и 0,55 соответственно.

Подставив в (2.13) фактическое значение Ψ , можно найти T_{np} , то есть срок службы до полного разрушения покрытия.

Накопление повреждаемости происходит от действия различных факторов (транспортной нагрузки, перепадов температуры и т.д.). Итоговый уровень нельзя получить простым суммированием.

С этой целью разработана специальная методика, основанная на эффекте «обращения связей» при изменении режима нагружения и температуры [3]. Установлено, что уровень работоспособности материала при изменении режима воздействия можно определить по условию

$$F_2 = F_1 (1 + E_{11}/E_c - E_{12}/E_c) + \Psi_1 (E_{12}/E_c - E_{11}/E_c), \quad (2.14)$$

где E_{11} и E_{12} – модули релаксации в условиях 1-го и 2-го режимов нагружения;

E_c – максимальный модуль упругости;

Ψ_1 – уровень повреждаемости;

F_1 и F_2 – уровни работоспособности.

Используя выражение (2.14), можно привести воздействие автомобилей за срок службы дорожной одежды к единому критерию.

На практике УП можно оценить теоретико-аналитическими и экспериментальными методами.

Получить уровень повреждаемости материала покрытия дорожной одежды, находящейся в эксплуатации, можно путем теоретических расчетов, опираясь на базовые положения кинетики накопления повреждаемости, представленные в предыдущем разделе.

Для этого необходимо оценить накопленный уровень повреждаемости от действия транспортной нагрузки и погоднo-климатических факторов и привести их к единому критерию с учетом эффекта обращения связей [3]. Расчет уровня повреждаемости осуществля- ют с помощью следующего алгоритма:

1. Определяют уровень повреждаемости от действия транспорт- ной нагрузки.

1.1. Вычисляют предельное число воздействий на материал по- крытия с точки зрения усталостной долговечности по сезонам экс- плуатации (весна, лето, зима, осень):

$$N_i^{np} = \left(\frac{R_i}{\sigma_i \cdot K} \right)^{m_i}, \quad (2.15)$$

где R_i – расчетная прочность материала покрытия, зависящая от свойств материала и сезона; принимается в зависимости от сезона и категории дороги;

i – сезон (1 – весна, 2 – лето, 3 – осень, 4 – зима);

σ_i – напряжение в покрытии, получаемое расчетом в зависимо- сти от конструкции дорожной одежды и сезона (см. разд. 1);

m_i – коэффициент усталости, зависящий от сезона.

1.2. Вычисляют фактическую интенсивность расчетных автомо- билей на полосу (по сезонам):

$$N_i = N \cdot T_i \cdot T, \quad (2.16)$$

где N – интенсивность расчетных автомобилей на одну полосу, авт./сут.;

T_i – продолжительность сезонов, сут.;

T – срок службы дорожной одежды.

1.3. Вычисляют уровень работоспособности покрытия по сезонам:

$$F_i = 1 - \frac{N_i}{N_i^{np}}. \quad (2.17)$$

1.4. Вычисляют приведенный уровень работоспособности с учетом эффекта обращения связей:

$$F_{np} = F_1 - 0,45(1 - F_2) - 0,9(1 - F_3) - 0,7(1 - F_4). \quad (2.18)$$

2. Определяют уровень повреждаемости и работоспособности от перепадов температуры:

$$FT = 1 - \frac{qTF_0(1 - K_e)}{F_{np}}. \quad (2.19)$$

Для условий РБ можно принять:

$$F_i = 1 - 0,02T, \quad (2.20)$$

где T – срок службы дорожной одежды.

3. Определяют уровень работоспособности от действия попеременного замораживания-оттаивания и воды:

$$F_M = 1 - \frac{qT_c(1 - K_e) + q(T - T_e)(1 - K_e)}{M}. \quad (2.21)$$

Для условий РБ можно принять:

$$F_M = 1 - 0,05T_c - 0,012(T - T_c), \quad (2.22)$$

где T_c – срок проведения первого среднего ремонта (от начала строительства).

4. Определяют уровень повреждаемости от действия природно-климатических факторов:

$$\Psi_T = (1 - F_T)^{4,44F_T - 0,4}; \quad (2.23)$$

$$\Psi_M = (1 - F_M)^{4,44F_M - 0,4}$$

5. Вычисляют общий приведенный уровень работоспособности.

5.1. Определяют приведенный уровень от температурно-временных факторов с учетом эффекта обращения связей:

$$F_T^{np} = 0,3F_T + (1 - \Psi_T)0,7; \quad (2.24)$$

$$F_M^{np} = 0,4F_M + (1 - \Psi_M)0,6.$$

5.2. Определяют общий приведенный уровень работоспособности:

$$F_0 = F_{np} - (1 - F_T^{np}) - (1 - F_M^{np}), \quad (2.25)$$

где F_{np} – см. п. 1.4.

6. Определяют общий приведенный уровень повреждаемости:

$$\Psi_0 = (1 - F_0)^{2,4F_0 - 0,44}. \quad (2.26)$$

На основании приведенного алгоритма разработана программа расчета уровня повреждаемости на ЭВМ.

Экспериментально уровень повреждаемости можно оценить только путем исследования долговременной прочности или усталостной долговечности. Для этого отбирают образцы материала покрытия в виде кернов или балочек и оценивают показатели долговечности (например, усталостной). Затем в лаборатории доводят образцы до рабочей температуры (140...160°C), готовят новые образцы, и снова производят оценку долговечности. Путем соотношения долговечности переформованных и исходных образцов определяют уровень повреждаемости. Следует подчеркнуть, что данная методика требует апробации и уточнения.

2.3.2. Оценка уровня надежности эксплуатируемой дорожной одежды

Оценку уровня надежности эксплуатируемой дорожной одежды производят в следующей последовательности:

1. Оценивают уровень повреждаемости материала покрытия теоретическими или экспериментальными методами.

2. Измеряют показатель прочности (модуль упругости дорожной одежды).

3. Корректируют полученное значение модуля за счет ввода показателя дефектности покрытия (путем умножения):

$$K = (\Psi_{np} - \Psi_{\phi}) / \Psi_{np}, \quad (2.27)$$

где Ψ_{np} и Ψ_{ϕ} – предельный и фактический уровень повреждаемости.

Значение предельного уровня следует принимать в границах 0,7...0,75.

4. Строят кривые распределения модуля, измененного с учетом показателя дефектности покрытия.

5. По методике разд. 1 вычисляют уровень надежности.

Если количество выполненных замеров небольшое, кривая распределения не строится. В этом случае оценивают коэффициент запаса следующим образом:

$$K_3 = \sum_{i=1}^n (K_i E_i) / n E_{mp}, \quad (2.28)$$

где K_i и E_i – показатели дефектности и модуля упругости в конкретной точке измерения;

E_{mp} – требуемый модуль, полученный по формуле (1.2);

n – число замеров.

По полученному коэффициенту запаса вычисляют уровень надежности, используя формулу (1.18).

Следует подчеркнуть, что рассмотренная методика не учитывает состояние материала покрытия. Данный вопрос в виде отдельной темы изложен в разд. 4.

3. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

В общем случае надежность дорожных одежд может быть повышена двумя методами:

- 1) материаловедческими – основанными на повышении расчетных характеристик материалов дорожных одежд;
- 2) конструктивными – основанными на изменениях в принципах конструирования дорожной одежды.

Рассмотрим данные вопросы более подробно.

3.1. Материаловедческие пути повышения надежности дорожной одежды

Повысить надежность дорожной одежды (при той же материалоемкости) можно путем увеличения расчетных характеристик материалов конструктивных слоев. Поэтому следует изучить влияние вида и структуры материалов на их расчетные характеристики.

Виды расчетных характеристик и методики их определения рассмотрены в разд. 2.

У монолитных материалов основными структурными факторами являются вязкость применяемого органического вяжущего и его свойства, плотность, содержание макрочастиц (щебня).

У несвязных материалов такими факторами выступают содержание частиц крупнее 5 мм, степень шероховатости частиц, плотность.

Свойства материалов на основе органических вяжущих существенно зависят от температуры и скорости деформирования (нагружения). В общем случае данная зависимость имеет вид S-образной кривой (рис. 3.1).

Поэтому расчетные характеристики материала очень сильно зависят от расчетной температуры. Поскольку расчетный температурный интервал очень узок, возможны случаи, когда менее качественные материалы имеют более высокие расчетные характеристики по сравнению с более качественными. Это относится к дегтебестону, асфальтобетонам на битумах второго структурно-реологического (менее теплоустойчивого) типов и др. и обусловлено именно «попаданием» максимальных свойств данного материала в расчетный интервал. Схематически эта зависимость показана на рис. 3.1. Из нее мы можем

видеть, что материалы с низкой прочностью при высоких и низких температурах имеют более высокие расчетные характеристики.

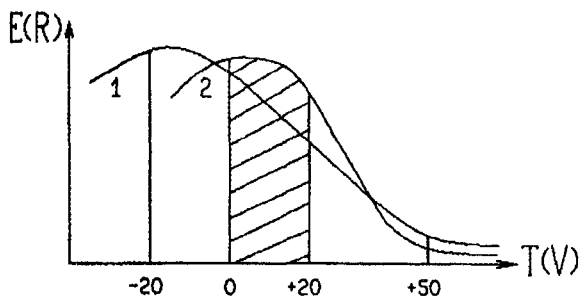


Рис. 3.1. Зависимость свойств материала (прочности, модуля) от температуры (скорости деформации):

1 - асфальтобетон; 2 - дегтебетон (заштрихованная область - расчетный период)

Таким образом, используя менее качественные материалы, можно повысить надежность дорожных одежд.

Данную парадоксальную ситуацию необходимо правильно использовать. Поскольку подобные слои неустойчивы к пластическим деформациям в летний период и хрупким - в зимний, их следует использовать в нижних слоях дорожной одежды. Тем самым будут сняты отрицательные моменты (деформационная устойчивость) и выделены положительные моменты (несущая способность).

Повышая вязкость органического вяжущего, мы повышаем и расчетные характеристики - модуль упругости и прочность на изгиб. Поэтому, применяя битумы более высокой вязкости, можно добиться повышения надежности дорожной одежды в целом.

Расчетные характеристики зависят от макро- и микроструктуры материалов: чем плотнее и однороднее структура, тем выше расчетные характеристики. Поэтому песчаные асфальтобетоны способствуют более высокой надежности дорожной одежды, чем щебеночные. Данная ситуация тоже обусловлена несоответствием периода расчета дорожной одежды и эксплуатации. Для устранения несоответствия следует правильно конструировать дорожную одежду (см. разд. 3.2).

Расчетные характеристики зернистых материалов (щебня, гравия, песка) можно повысить за счет ввода дробленых частиц, содержание которых должно быть не менее 25% по массе. При этом следует иметь в виду, что модуль упругости выше у материалов с

более плотной структурой. В этом плане эффективны смеси подобранного состава (щебня, гравия, гранитного отсева и т.д.).

Универсальным приемом повышения надежности дорожной одежды является применение новых конструкционных материалов, к которым следует отнести бетоны на органогидравлических вяжущих, армированные асфальто- и цементбетоны, асфальтобетоны на твердых битумах и др. Подробно вопрос применения новых материалов рассматривается в разд. 5.

3.2. Конструкционные пути повышения надежности дорожных одежд

В качестве конструктивных мероприятий повышения надежности дорожной одежды можно предложить 3 вида устройства дорожных покрытий:

1. Замену многослойного асфальтобетонного покрытия с убывающей по толщине прочностью на покрытие с возрастающей прочностью с общим расходом битума не более 4% и устройством поверхностной обработки.

2. Устройство покрытий из асфальтобетонов дискретной структуры с поверхностной обработкой.

3. Применение различных прослоек между конструктивными слоями на основе синтетических материалов.

Первые два вида предполагают устройство по покрытию замыкающего слоя в виде поверхностной обработки.

Такой подход к конструированию дорожных покрытий является принципиально новым, т.к. защитный слой создает иные условия работы материала покрытия и позволяет решить следующие задачи:

- 1) замедлить старение материала покрытия, а следовательно, повысить вязкость битума, применяемого для устройства покрытия, что, в свою очередь, позволяет повысить расчетные характеристики и снизить толщину слоя;

- 2) более широко использовать местные материалы (песчано-гравийные смеси и отсев), сохраняя равнопрочность дорожной одежды, что достигается за счет повышения вязкости битума и применения асфальтобетонов дискретной структуры.

Первая задача предполагает нетрадиционное проектирование дорожной одежды. В нижний слой укладывается песчаный плотный

бетон (ПГС и отсев) с расходом битума повышенной вязкости 4,5%; верхний состоит из жесткой щебеночной смеси с расходом битума 3,5...4%. Благодаря такому подходу улучшается напряженное состояние дорожной одежды и возникает возможность снижения ее толщины.

Рассмотрим две равнопрочные конструкции дорожной одежды (рис. 3.2) – по «эталону» (слева) и по первому виду (справа).

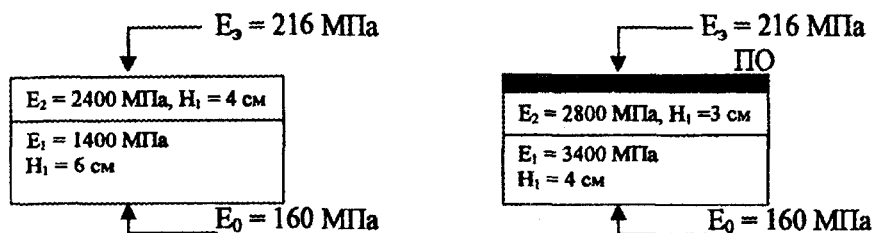


Рис. 3.2. Равнопрочные конструкции дорожных одежд при различных схемах расположения слоев

Из представленных расчетом данных видно, что эталонная конструкция толщиной 10 см может быть заменена конструкцией в 7 см без ущерба прочности.

Второй и третий виды устройства покрытий основаны на применении бетонов дискретной структуры.

Асфальтобетоны дискретной структуры – это разновидность композитов, состоящих из обогащенной вяжущим матрицы и минеральных частиц с пониженной толщиной пленки вяжущего либо вообще без него.

Можно предложить три технологических приема получения материалов дискретной структуры:

1. Органическим вяжущим обрабатывают 70...90% общей массы минеральных частиц, затем подают оставшиеся 10...30% частиц и водный раствор ПАВ. В результате наличия водного раствора ПАВ вторично подаваемые частицы не покрываются вяжущим в процессе смешения. Однако при транспортировке и укладке вода испаряется, и при уплотнении за счет наличия ПАВ частицы прочно сцепляются с остальной массой конгломерата.

2. Органическим вяжущим обрабатывают 70...98% общей массы минеральных частиц при температуре 120...160 °С, затем подают

оставшиеся частицы естественной температуры и влажности. Роль «барьера», препятствующего прилипанию вяжущего в процессе смешения, выполняют пониженная температура и пленка влаги на поверхности вторично подаваемых частиц.

3. Минеральный материал обрабатывают 40...70% общей массы органического вяжущего, затем подают водный раствор ПАВ и оставшиеся 30...50% вяжущего. Такой способ позволяет получить частицы с пониженной толщиной пленки вяжущего за счет его концентрации на частицах, обработанных первой порцией вяжущего. В качестве ПАВ предлагается использовать ингибитор отложения солей ИОМС-1, представляющий собой 25...30%-ный водный раствор органических кислот с небольшой примесью неорганических фосфатов. Данная технология может увеличить механические характеристики на 10...30%.

На поведение материалов дискретной структуры будут влиять одновременно два процесса: *упрочнение* за счет обогащения вяжущим определенного объема материала и *разупрочнение* за счет появления неоднородностей и снижения эффективной площади сечения материала. При оптимальном сочетании указанных факторов конгломераты с дискретной структурой будут иметь улучшенные свойства.

Зависимость свойств (динамического модуля упругости, предела прочности на растяжение при изгибе) асфальтобетонов от количества вяжущего можно представить в виде

$$R(E) = R_0(E_0)X^{A-BX}, \quad (3.1)$$

где X – количество вяжущего, %;

A и B – коэффициенты, равные соответственно 1,5...4,0 и 0,01...0,06;

$R_0(E_0)$ – свойства материала при $X = 1$.

Создание дискретной структуры материала будет целесообразно, если выполняется условие

$$(1-K) \left(\frac{X}{1-n} \right)^{A-BX(1-n)} \geq X^{A-BX}, \quad (3.2)$$

где n – количество необработанных вяжущих частиц, доли единицы;

K – коэффициент, учитывающий сцепление необработанных вяжущим частиц с остальной массой конгломерата.

Если $K = n$, – сцепление отсутствует; если $K = 0$, – сцепление максимальное.

Теоретические расчеты показали, что оптимальное количество необработанных вяжущим частиц составляет 5...20% в зависимости от количества вяжущего. Такое положение соответствует и выводам теории перколяции, поскольку перколяционные «мостики» из необработанных частиц могут возникать при объемной их концентрации не менее 17%.

В результате экспериментальных исследований было установлено, что за счет регулирования толщины пленки вяжущего удастся повысить прочность на сжатие и изгиб, особенно при высоких скоростях деформирования. Это позволяет сократить расход вяжущего из условия равнопрочности на 10...30%. За счет обогащения вяжущим части конгломерата снижается водонасыщение и происходит увеличение предельной деформации.

Оптимальное количество необработанных частиц зависит от вязкости вяжущего и его количества. С увеличением вязкости вяжущего оптимум структуры смещается в сторону большего количества необработанных частиц.

При сравнении теоретических значений и экспериментальных данных установлено, что величина коэффициента K в уравнении (3.2) составляет $(0,1 \dots 0,7)n$, т.е. сцепление необработанных частиц с остальной массой конгломерата больше нуля, но меньше сцепления обработанных вяжущим частиц. Такое положение может привести к падению водо- и морозостойкости.

Для оценки водо- и морозостойкости исследовали прочностные свойства бетонов однородной и дискретной структуры, содержащих различное количество необработанных вяжущим частиц. Образцы были подвергнуты 15 циклам замораживания и оттаивания с длительной выдержкой их после каждого цикла в воде. Общая продолжительность выдержки составила 20 суток. Установлено, что бетоны дискретной структуры не уступают по морозостойкости обычным.

Повышение морозостойкости объясняется более высокой плотностью и прочностью основной массы конгломерата, что компенсирует слабое сцепление необработанных частиц.

Материалы дискретной структуры обладают также достаточным сопротивлением износу, что гарантирует их устойчивость под действием построечного транспорта до устройства покрытия.

Дискретная структура рекомендуется для пористых битумопесчаных смесей, применяемых в нижних слоях покрытий и основаниях. Битумопесчаные смеси, получаемые обычным способом, требуют повышенного расхода битума и имеют невысокие физико-механические показатели. За счет создания дискретной структуры при том же расходе битума расчетные характеристики удастся повысить на 20...30%. В качестве материалов, подаваемых на второй ступени смешения, можно использовать и часть фракции мельче 5 мм.

Создание дискретной структуры целесообразно при использовании комбинированных вяжущих, например, битумов и дегтей, некондиционных вяжущих из отходов производства. Так, если дегтем обработать крупную фракцию, а битумом – мелкую, удастся повысить прочность материала и снизить расход вяжущего. Готовят данные материалы следующим образом. Щебень обрабатывают дегтем при 110...120 °С и перемешивают 10...15 с, затем подают песок, минеральный порошок, битум и производят окончательное перемешивание. Такая технология позволяет улучшить деформативность материала, снизить токсичность.

Обработка менее вязким вяжущим крупной фракции целесообразна также с точки зрения снижения температурных внутрискруктурных напряжений.

Таким образом, применение бетонов дискретной структуры позволяет широко использовать местные пески и песчано-гравийные смеси, добиться экономии вяжущего. Подобные бетоны целесообразно использовать на дорогах местного значения с защитным слоем.

Исследования свойств бетонов дискретной структуры на материалах ДРСУ – 121 подтвердили эффективность дискретной структуры. На рис. 3.3 представлена зависимость относительного увеличения прочности бетона за счет создания дискретной структуры в зависимости от вязкости и количества битума. Как видно из данного рисунка, дискретная структура особенно эффективна для бетонов на битумах повышенной вязкости при содержании битума 5...6%, т. е. именно для бетонов на местных материалах и песчано-гравийных смесях. Сравним конструкции по второму виду и по эталону.

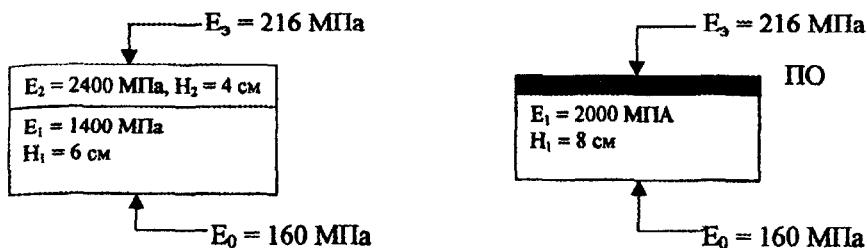


Рис.3.3. Равнопрочные конструкции дорожных одежд

Расход битума в конструкции эталона составляет 12 кг/м^2 , а в предлагаемой с учетом поверхностной обработки – $10,1 \text{ кг/м}^2$. Экономия битума составляет 16%.

В современных условиях, особенно при проектировании дорог высоких категорий, с целью повышения надежности дорожных одежд все шире используют прослойки из синтетических тканых и нетканых материалов, в качестве которых могут использоваться стеклоткани, геотекстиль, сетки из полиэстера и др. Прослойки укладывают поверх подстилающего слоя или слоя основания; возможна укладка также между слоями асфальтобетона. В результате надежность дорожной одежды возрастает на 20...30%.

Общим критерием эффективности того или иного способа повышения надежности является *экономический эффект*, подсчет которого может быть произведен за счет прямой экономии материальных ресурсов (бетона дискретной структуры) или продления срока службы (повышения уровня надежности) дорожной одежды. В последнем случае расчет эффекта производят по условию

$$\Xi = P_{np} - P_{np}^3 = C_2 \cdot \sum_{i=1}^{t_1} r_o \cdot t_0 - C_1 \cdot (1 + r_o \cdot t_1), \quad (3.3)$$

где P_{np} и P_{np}^3 – приведенные затраты на устройство предлагаемой конструкции дорожной одежды (покрытия из нового материала) и эталона соответственно;

C_1 и C_2 – стоимость строительства новой конструкции и эталона;

r_o – коэффициент отдаленности для новой конструкции;

t_1 и t_0 – срок службы новой конструкции и эталона соответственно.

Срок службы новой конструкции определяют по формуле

$$t_1 = t_0 \cdot P_{01}/P_0, \quad (3.4)$$

где P_0 – общий уровень надежности новой конструкции;

P_{01} – общий уровень надежности эталона.

Для повышения надежности жестких дорожных одежд полезным может служить опыт модернизации дороги М-1/Е-30, изложенный в работе [4].

Отдельная тема – повышение надежности дорожных одежд, находящихся в эксплуатации. Если коэффициент запаса по (2.28) недостаточен, дорожная одежда требует усиления. Обычно усиление производят путем устройства одного или нескольких слоев асфальтобетона, толщина которых назначается с помощью расчета по методике [1].

Особенности технологии усиления и реконструкции дорожных одежд можно освоить по [5].

4. НАДЕЖНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

4.1. Общие положения надежности материалов дорожных покрытий

Надежность и долговечность дорожной одежды определяются не только толщиной и количеством слоев, но и качеством материалов дорожных покрытий, их структурой и свойствами.

Конструкционные материалы дорожных одежд работают в сложных условиях. В летний период дорожное покрытие нагревается до температуры 50...60°C, что ведет к снижению вязкости битумных связей и падению прочности. В результате от действия транспортной нагрузки могут появляться пластические деформации в виде волн, колея, гребенки и т.д. При охлаждении покрытия зимой до -20...-30°C возникают растягивающие температурные напряжения, которые могут превысить предел прочности и вызвать разрушения в виде продольных и поперечных трещин.

Циклическое воздействие транспортной нагрузки, попеременное замораживание-оттаивание вызывают дополнительное развитие повреждаемости в структуре материала и ускоряют его разрушение.

На долговечность влияют также внутренние температурные напряжения, вызванные несопадением коэффициентов температурного расширения составляющих материала. Такое положение приводит к большой сложности оценки уровня надежности, поскольку в большинстве случаев повышение сопротивления материала одному из внешних воздействий ведет к снижению сопротивления другим. Так, рост вязкости битума увеличивает сдвигоустойчивость, но снижает температурную трещиностойкость.

Поэтому необходимо учитывать одновременно влияние всех факторов внешнего воздействия, для чего должна быть разработана соответствующая методика.

Материалы конструктивных слоев дорожных одежд, и особенно – покрытия, должны обеспечить выполнение следующих требований:

1. Сопротивление образованию пластических деформаций в летний период (сдвигоустойчивость).

2. Сопротивление образованию температурных трещин в зимний период (трещиностойкость).

3. Водо- и морозостойкость (коррозионная стойкость).

4. Способность выдерживать многократное воздействие транспортной нагрузки в течение расчетного срока службы (усталостная долговечность).

Структуру материала дорожного покрытия (основания) можно считать оптимальной, если она имеет максимальную надежность по всем факторам внешнего воздействия (критерии сдвиго- и трещиностойкости, морозостойкости, усталости). Поэтому необходимо разработать методику, учитывающую весь комплекс воздействий транспортной нагрузки и погодно-климатических факторов. В основу методики положена теория надежности, позволяющая оценить частные уровни надежности по каждому критерию и, тем самым, предсказать долговечность и срок службы материала.

Для практической реализации данных положений необходимо разработать методику определения частных уровней надежности по вышеуказанным критериям. Для этого необходимо по каждому из критериев (сдвиго- и трещиностойкости, усталости, морозостойкости) вычислить коэффициенты запаса

$$K_i = P_i^{\phi} / P_i^{mp}, \quad (4.1)$$

где P_i^ϕ – фактические свойства материала, ответственные за появление тех или иных деформаций;

P_i^{mp} – требуемые свойства, при которых эти деформации отсутствуют в течение 1-го года службы.

По величине коэффициентов запаса можно определить уровни надежности. Для этого целесообразно воспользоваться методикой, изложенной в разд. 1.

Для материалов дорожных покрытий задача несколько упрощается, поскольку на основе наблюдений за опытными участками и обработки полученных данных установлены виды функций распределения коэффициентов запаса по основным критериям деформационной устойчивости. Такими функциями являются: распределение Вейбулла или нормальное распределение (сопротивление пластическим деформациям); логонормальное или гамма-распределение (сопротивление температурным трещинам), триангулярное распределение или распределение максимального значения (сопротивление усталостным трещинам), логистическое распределение или распределение максимального значения (сопротивление коррозионным деформациям).

Для распределения Вейбулла вида

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < a; \\ \frac{n}{b} \left(\frac{x-a}{b}\right)^{n-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^n}, & x \geq a, \end{cases} \quad (4.2)$$

с параметрами $a \in R, b > 0, n \in N$ связь коэффициентов запаса (K_3) и уровня надежности (P) имеет вид

$$K_3 = a + b \sqrt[n]{\ln(1-P)^{-1}}. \quad (4.3)$$

Аналогично были получены зависимости связи коэффициентов запаса и уровней надежности для других кривых.

Путем численного интегрирования с учетом реальных параметров кривых распределения были получены зависимости коэффициентов запаса и частных уровней надежности для различных параметров деформационной устойчивости (рис. 4.1).

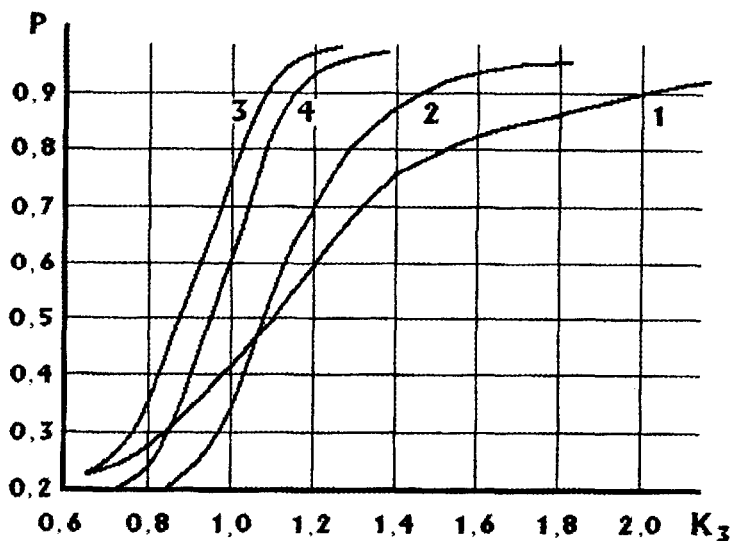


Рис. 4.1. Зависимость уровня надежности и коэффициентов запаса: 1 – по устойчивости к пластическим деформациям; 2 – по температурным трещинам; 3 – по усталостным трещинам; 4 – по коррозии

После вычисления частных уровней надежности (рис. 4.1) по формуле (1.27) определяют общий уровень и делают соответствующие заключения о долговечности покрытия и возможных сроках ремонта.

Для практической реализации приведенных положений важнейшей является задача определения коэффициентов запаса. Прежде чем перейти к конкретным методикам, необходимо изучить основные закономерности поведения материалов дорожных покрытий в широком температурно-временном поле под действием нагрузки.

4.2. Основы теории деформирования и разрушения композиционных строительных материалов

Дорожно-строительные материалы, особенно на основе органических вяжущих, обладают ярко выраженными реологическими свойствами [6], [7], что ведет к сильному влиянию температурно-временных факторов и уровня напряженного состояния на кинетику деформирования и разрушения. Поэтому первыми и естественными решениями для описания свойств асфальтобетонов явились принципы реологического моделирования [6], [7]. Использовались моде-

ли Бингама, Максвелла, Бюргерса, комбинированные [6], [7], [8] и ряд других. Известно применение реологических моделей и к цементобетону [9]. Несмотря на наглядность и простоту, применение реологических моделей возможно только в некоторых узких пределах, поскольку нельзя в рамках одной модели учесть всю гамму свойств асфальтобетона (область линейной и нелинейной вязкоупругости, влияние напряжения и времени действия нагрузки и т.д.). Кроме того, само использование реологических моделей не имеет четкого физического и термодинамического объяснения с точки зрения строения вещества.

Более обоснованным является использование теорий ползучести и термовязкоупругости. Классической теорией термовязкоупругости, позволяющей описать зависимость между напряжением и деформацией в температурно-временном поле, является теория наследственности Больцмана-Вольтерра. Возможность применения данной теории к асфальтобетону показана в работе [10]. В настоящее время разработаны методы нелинейной теории наследственности [11], [12]. Для использования теории наследственности в практических целях важно правильно выбрать вид подынтегральных ядер и определить значения входящих в них коэффициентов. В большинстве случаев, в том числе применительно к асфальтобетону, используются степенные ядра [10]. В то же время существуют ядра в виде экспоненциальных функций, дробно-экспоненциальных функций и др. [11], [12]. Особенно важно найти наиболее физически обоснованные с точки зрения структурно-молекулярного строения вещества ядра. Необходимо также, учитывая большую сложность практического использования теории наследственности, выработать упрощенные подходы прогнозирования свойств материала в области, не достижимой в эксперименте.

Основным методом прогнозирования свойств материала в температурно-временном поле является принцип температурно-временной аналогии (ТВА) [13], в соответствии с которым экспериментальные кривые, полученные при различных температурах, можно совместить путем параллельного переноса вдоль оси времени (скорости деформации). Однако ТВА применяется для линейной области вязкоупругости и термореологически простых тел.

Имеется ряд работ по применению принципа ТВА к асфальтобетону [10], [14], причем говорится о его использовании, в основном,

в области линейной вязкоупругости [10]. Однако есть работы о распространении принципа ТВА и в области нелинейной вязкоупругости [14]. Такая ситуация – не исключение, поскольку в последнее время имеются теоретические обоснования распространения метода на нелинейную область [12]. В то же время следует подчеркнуть, что в нелинейной области нельзя получать обобщенные кривые путем параллельного переноса, необходимо осуществлять и их поворот, чего не сделано в [14].

С целью упрощения анализа и методики прогнозирования свойств материала в температурно-временном поле желательно иметь какой-либо простой критерий, характеризующий поведение разных материалов независимо от вида и структуры. Поскольку деформирование и разрушение материалов, содержащих органическое вяжущее, носит релаксационный характер, основополагающими факторами, определяющими их свойства, являются соотношение времени действия нагрузки и релаксации (критерий Дебори), температура, уровень напряжения.

Попытка объединить данные факторы в единый критерий применительно к асфальтобетону, пожалуй, впервые была предпринята Н.Н.Ивановым [15] с помощью коэффициента пластичности, который отражал влияние скорости деформации на прочность асфальтобетона. Впоследствии было теоретически обосновано положение, что коэффициент пластичности характеризует вероятность совершить в единицу времени пластическую деформацию [16], которое было бы справедливым, если бы коэффициент пластичности изменялся от 0 до 1. Однако экспериментально это не подтверждается [17]. Кроме того, зависимость коэффициента пластичности от температуры носит экстремальный характер, свидетельствующий о том, что коэффициент пластичности не может служить достаточно объективным обобщающим критерием поведения различных материалов.

Более обоснованно использовать коэффициенты приведения в уравнении ВЛФ. Дело в том, что, если к материалам применимо уравнение ВЛФ, все вязкие элементы модели вязкоупругого тела имеют одинаковую температурную зависимость [11], [12]. Однако на практике определение коэффициентов приведения требует больших трудозатрат и высокой квалификации персонала, что снижает практическую ценность метода.

Использовались и другие критерии оценки релаксационной и деформационной способности, – в частности, модуль упругости и вязкость [7]. Последняя отражает способность материала к рассеянию энергии и действительно в определенной степени служит мерой релаксационной способности. Однако практическое применение вязкости связано с трудностями методологического характера. Величина вязкости зависит от времени действия нагрузки и ее величины. Получить же кривую ползучести с большим прямолинейным участком применительно к дорожным бетонам вряд ли возможно.

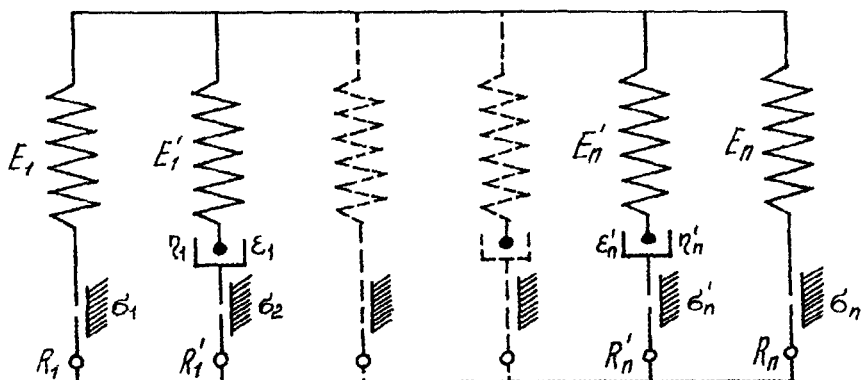
Таким образом, проблема обобщенного критерия деформационного поведения материала различного состава корректно не решена для материалов покрытий дорожных одежд.

Материалы дорожных покрытий сочетают свойства коагуляционных, конденсационных и кристаллизационных структур. В подобных системах расположение различных связей, вяжущего матрицы и вторичной структуры неравномерно по объему материала, прочность и деформативность структурных агрегатов и кластеров также очень неоднородна. С точки зрения механики деформирования и разрушения структуру подобных материалов можно представить в виде феноменологической модели с комплексным набором упругих, вязких и пластических связей, чередующихся по последовательной и параллельной схемам (рис. 4.2).

В предлагаемой модели каждая связь (упругая, вязкая или пластическая) имеет собственные механические характеристики. В результате материал в целом обладает спектром упруго-вязкопластических свойств. Изменение температуры, величины нагрузки и режима нагружения может приводить к замене одних связей другими (упругих – вязкими). Поскольку математическое описание предложенной модели практически сложно, ее целесообразно использовать как физический аналог протекающих в материале процессов.

В зависимости от температуры, режима нагружения, состава материала в процесс деформирования будет вовлекаться различное число упругих и вязкопластических связей. Соответственно материал в различной степени будет проявлять свойства упругого или вязкого тела.

В случае, если деформируются только упругие связи, наблюдается полная обратимость деформации, разрушение происходит по механизму хрупкого тела, отсутствует влияние времени действия нагрузки. И наоборот, вязкопластические связи ответственны за появление остаточных деформаций, влияние температуры и времени нагружения.



$E_1 \neq E_2 \neq \dots \neq E_n \neq E_1 \neq \dots \neq E_n$ (модуль упругости)
 $\eta_1 \neq \eta_2 \neq \dots \neq \eta_n$ (вязкость)
 $R_1 \neq R_2 \neq \dots \neq R_n \neq R_1 \neq \dots \neq R_n$ (прочность)
 $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 \neq \dots \neq \varepsilon_n$ (предельная деформация)
 $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \dots \neq \sigma_n$ (предел пластичности)

Рис. 4.2. Феноменологическая модель композиционного материала

Обозначим долю упругих связей, ответственных за состояние материала, некоторым скаляром n_y , а вязкопластических n_σ . В дальнейшем n_σ будем называть вязкими связями. При этом должно выполняться условие

$$n_y + n_\sigma = 1,0. \quad (4.4)$$

Поскольку в результате деформации вязкопластических связей происходит полное рассеяние приложенной энергии, теоретически можно принять, что соотношения n_σ и n_y определяются отношением диссипированной энергии к приложенной. В этом случае количество n_y и n_σ зависит, прежде всего, от релаксационных свойств материала и времени действия нагрузки. Например, для материала, описываемого реологической моделью Максвелла, отношение диссипированной энергии к приложенной можно выразить формулой [18]:

$$R_\tau = n_\sigma = \frac{t/\tau + e^{-t/\tau} - 1}{t/\tau - 0,5e^{-2t/\tau} - 0,5}, \quad (4.5)$$

где t – время действия нагрузки;

τ – время релаксации.

Анализ зависимости (4.5) показывает, что количество вязких связей характеризуется соотношением времени действия нагрузки и релаксации.

Реальный материал обладает релаксационным спектром (см. рис. 4.2), и получить теоретические зависимости R_t , приемлемые для практики, невозможно. Поэтому следует разработать простую и удобную методику определения n_y и n_σ .

Свойства материалов дорожных покрытий зависят от температуры и скорости деформации по экстремальной кривой. Максимум кривой соответствует положению механического стеклования и переходу материала в хрупкое состояние. Можно полагать, что в этом случае работают только упругие связи и $n_y = 1$. Прочность материала, соответствующую данным условиям, назовем предельной структурной прочностью и обозначим R_c , а максимальный модуль соответственно – E_c (рис. 4.3).

Поскольку структура бетона многокомпонентна и включает каменный материал, органическое вяжущее и тонкодисперсный наполнитель, а также вторичные структуры, образованные конденсационно-кристаллизационными связями, возникает вопрос, всегда ли при достижении R_c материал работает в упругой стадии? Ведь возможны случаи разрушения композита в результате низкой прочности частиц каменного материала, хотя битумные связи еще обладают вязкими свойствами. При рассмотрении подобных случаев следует иметь в виду, что прочность композита зависит от прочности всех структур. Если наиболее слабым является каменный материал, то можно записать:

$$R_k = R_{км} n_{км} + \sigma_1 n_1 + \sigma_\sigma n_\sigma, \quad (4.6)$$

где $R_{км}$, $n_{км}$ – прочность и удельное количество каменного материала;

σ_1 , σ_σ – напряжение в первичной и вторичной структурах;

n_1 , n_σ – удельное количество первичной и вторичной структур.

Так как с понижением температуры или ростом скорости деформации σ_1 и σ_σ увеличиваются, будет наблюдаться рост прочности композита, который прекратится, только когда будет достигнута

температура механического стеклования. Безусловно, прочность заполнителя оказывает влияние на абсолютные значения R_c и E_c .

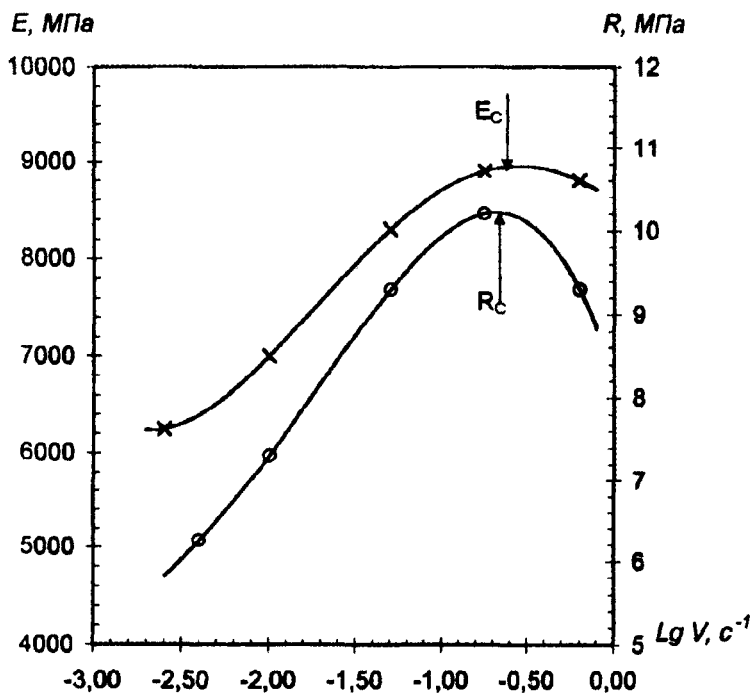


Рис. 4.3. Зависимость прочности (R) и модуля упругости (E) от скорости деформации

Таким образом, модуль E_c соответствует $n_y = 1$, и энергия, приложенная к материалу, накапливается без рассеяния. Когда в работу включаются вязкопластические связи, значение модуля снижается и принимает некоторый уровень E_t , зависящий от температуры, режима нагружения и т.д. Разница между E_c и E_t отражает интенсивность рассеяния энергии.

Пусть материал деформируется с некоторой скоростью деформации до уровня деформации ε_0 (рис. 4.4). Данному уровню деформации будет соответствовать значение напряжения $\sigma_c = \varepsilon_0 E_c$ в упругой стадии работы и $\sigma_t = \varepsilon_0 E_t$ - в вязкоупругой.

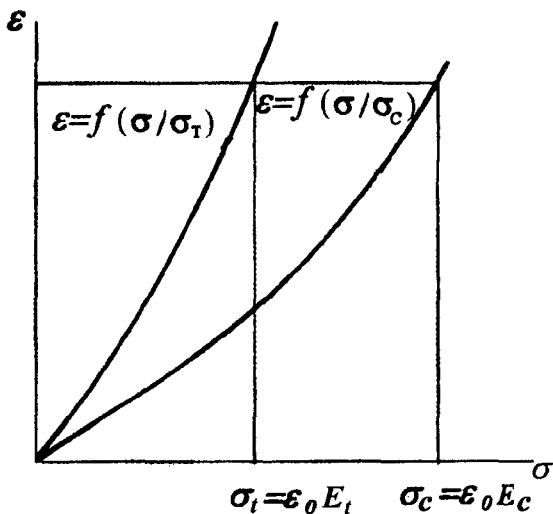


Рис. 4.4. Схема к выводу зависимости (4.12)

Зависимость между напряжением и деформацией $\varepsilon = f(\sigma)$ представим в приведенных координатах: в вязкоупругих $\bar{\varepsilon} = f(\bar{\sigma})$; $\bar{\varepsilon} = \varepsilon/\varepsilon_0$; $\bar{\sigma} = \sigma/\sigma_c$; в упругих $\bar{\sigma} = \sigma/\sigma_t$. Предположим, что в приведенных координатах $(\bar{\varepsilon}, \bar{\sigma})$ зависимость между напряжением и деформацией описывается аффинными кривыми. При одинаковом уровне деформации отношение между напряжением в упругой и вязкоупругой стадии одинаково и равно коэффициенту аффинности:

$$\beta = \sigma_1/\sigma_2 = \sigma_c/\sigma_t = E_c/E_t. \quad (4.7)$$

Подобная запись справедлива, поскольку вытекает из определения E_c и E_t . Тогда в упругой стадии

$$\bar{\varepsilon} = f(\sigma/\sigma_c) \text{ или } \sigma/\sigma_c = f^{-1}(\bar{\varepsilon}), \quad (4.8)$$

в вязкоупругой

$$\varepsilon = f(\sigma/\sigma_t) \text{ или } \sigma/\sigma_t = f^{-1}(\varepsilon). \quad (4.9)$$

Используя выражение (4.7) и схему рис. 4.4, определим удельное количество вязких связей:

$$\begin{aligned}
 n_g &= \frac{W_1 - W_2}{W_1} = \\
 &= \frac{\left(\sigma_c - \int_0^{\sigma_c} f(\sigma/\sigma_c) d\sigma \right) - \left(\sigma_t - \int_0^{\sigma_t} f(\sigma/\sigma_t) d\sigma \right)}{\left(\sigma_c - \int_0^{\sigma_c} f(\sigma/\sigma_c) d\sigma \right)} = \quad (4.10) \\
 &= \frac{\left(\sigma_c - \sigma_c \int_0^{\sigma_c} f(\sigma/\sigma_c) \frac{d\sigma}{\sigma_c} \right) - \left(\sigma_t - \sigma_t \int_0^{\sigma_t} f(\sigma/\sigma_t) d\sigma \right)}{\left(\sigma_c - \sigma_c \int_0^{\sigma_c} f(\sigma/\sigma_c) \frac{d\sigma}{\sigma_c} \right)}.
 \end{aligned}$$

Введем переменную $Z_c = \sigma/\sigma_c$, $Z_t = \sigma/\sigma_t$ (переменная интегрирования может быть обозначена любой буквой). Тогда

$$\begin{aligned}
 n_g &= \frac{\left(\sigma_c - \sigma_c \int_0^1 f(Z_c) dZ \right) - \left(\sigma_t - \sigma_t \int_0^1 f(Z_t) dZ \right)}{\left(\sigma_c - \sigma_c \int_0^1 f(Z_c) dZ \right)} = \\
 &= \frac{1 - \sigma_t/\sigma_c \left(1 - \int_0^1 f(Z_t) dZ \right)}{\left(1 - \int_0^1 f(Z_t) dZ \right)} = 1 - \sigma_t/\sigma_c. \quad (4.11)
 \end{aligned}$$

Учитывая (4.7), получим

$$n_{\sigma} = 1 - E_t/E_c \quad (4.12)$$

или

$$n_y = E_t/E_c. \quad (4.13)$$

Согласно (4.13), удельная доля упругих связей, вовлеченных в процесс деформирования, представляет собой отношение деформации материала к ее мгновенноупругой части. Следует подчеркнуть, что количество упругих и вязких связей в структуре материала постоянно. Меняется только соотношение между количеством связей, вовлеченных в процесс деформирования, т.е. n_y – это фактически и доля упругого состояния материала. Если полагать, что вязкопластические связи изменяют свойства материала (модуль деформации, прочность) пропорционально скорости деформации, а прочность упругих связей соответствует R_c , значение n_y можно определить из условия

$$n_y = (CR_1 - R_2)/(C - 1)R_c, \quad (4.14)$$

где R_1 и R_2 – характеристики материала, соответствующие скоростям деформации V_1 и V_2 ; $C = V_1/V_2$.

В связи с тем, что прочность упруговязких материалов носит релаксационный характер, возникает возможность найти соотношение E_t/E_c через отношение прочности материала при конкретной температуре и скорости деформации R_t и R_c . На взаимосвязь прочности с процессами молекулярной релаксации указано в работах [19], [20]. Анализ экспериментальных исследований для различных видов материалов подтвердил это положение. Оказалось, что значение n_y можно вычислить следующим образом:

$$n_y = E_t/E_c = (R_t/R_c)^{1/m}, \quad (4.15)$$

где m – параметр, зависящий от вида материала.

Обработка данных на ЭВМ показала, что для композиционных материалов (асфальтобетоны с добавкой цементного теста, дробле-

ный асфальтобетон, обработанный цементным раствором, и дегтезолминеральные композиции) $m = 0,9 \dots 1,0$ (коэффициент корреляции – 0,7); для обычных асфальтобетонов $m = 0,8$ ($K_p = 0,875$).

Значение n_y изменяется в процессе ползучести и релаксации, поскольку E_t является функцией напряжения и времени действия нагрузки. Это приводит к сложному влиянию процессов ползучести и релаксации на свойства материала и механику разрушения. Более подробно на данном аспекте остановимся ниже.

В настоящее время признано, что для описания поведения материалов в температурно-временном поле наилучшие результаты дает теория наследственности, которая лучше других теорий описывает свойства при меняющихся напряжениях [11], [12]. Данные теории основаны на усовершенствовании теории Больцмана-Вольтерра и применимы как в линейной, так и в нелинейной области вязкоупругости. Для аппроксимации кривых релаксаций напряжений в нелинейной области используют способ, основанный на главной кубичной теории Ильюшина [12].

В то же время несмотря на признание теории наследственности как фундаментальной базы поведения материалов важнейшим вопросом является выбор ядра релаксационной функции, которое бы наилучшим образом позволило осуществить аппроксимацию экспериментальных зависимостей ползучести и релаксации.

Для описания свойств полимеров наибольшее распространение получили степенные и дробные ядра подынтегральной функции [12], [21]. Однако этот метод не раскрывает физического смысла процесса и не позволяет оценить влияние структурных факторов на поведение материала, что не дает возможности осуществить обобщение полученных результатов и распространить их за пределы эксперимента. Поэтому для описания свойств дорожно-строительных материалов решено использовать новые подынтегральные ядра, полученные на основе изменения термодинамической функции в ходе процесса [22].

Согласно [22], материал состоит из некоторых кинематических единиц – «релаксаторов» и «нерелаксаторов». К «релаксаторам» относят различные атомные группы, повторяющиеся звенья, сегменты макромолекул, отдельные элементы свободного объема, микрополости концентрации напряжений и т.д. Движущей силой релаксации является производство энтропии системы, которая возрастает в ходе процесса вследствие диффузии и взаимодействия релаксаторов.

На основе теоретических исследований выделены два вида ядер релаксации [22]. Первый вид получен из предположения, что лимитирующей стадией процесса релаксации напряжений является скорость взаимодействия релаксаторов, под которыми подразумеваются различные микрополости в материале, отдельные слабые места и т.д. При этом происходит переход этих областей в нерелаксирующий материал, в котором релаксационные процессы уже завершены:

$$T_1(\tau) = -\frac{S_0}{k_b m_1} \left\{ \frac{1}{[f_1(\tau) - \alpha_0] \ln[f_1(\tau) - \alpha_0] + [1 - f_1(\tau) + \alpha_0] \ln[1 - f_1(\tau) + \alpha_0]} + \frac{1}{\ln 2} \right\}, \quad (4.16)$$

где $f_1(\tau) = \frac{1}{(1 + k^* \cdot \tau / \beta)^\beta}$; $\alpha_0 = 10^{-10}$

(функция $f_1(\tau)$ имеет физический смысл только при $f_1(\tau) \geq 0,5$);

k^* пропорциональна константе скоростей взаимодействия релаксаторов.

$$\beta = 1/(n-1),$$

где n – порядок реакции;

α_0 – доля нерелаксаторов (областей с завершенными релаксационными процессами), образующихся к моменту достижения требуемой постоянной деформации;

S_0 – начальная энтропия системы;

k_b – константа Больцмана;

m_1 – общее число областей – релаксаторов и нерелаксаторов в единице объема материала, умноженное на $\int_0^\infty T_1^*(\tau) d\tau$.

Как отмечено выше, функция (4.16) получена в предположении, что лимитирующей стадией процесса релаксации напряжения является скорость взаимодействия релаксаторов, под которыми подразумеваются различные микрополости в материале, отдельные слабые места и т.д. При этом происходит переход этих областей в нерелаксирующий материал, в котором релаксационные процессы уже завершены.

Второй вид ядер $T_2(\tau)$ получен в предположении, что лимитирующей стадией процесса релаксации напряжения или ползучести является диффузия образующихся нерелаксаторов в материале образца. Такое ядро имеет вид [23]:

$$T_2(\tau) = -\frac{S_0}{k_b m_2} \left\{ \frac{1}{f_2(\tau) \ln f_2(\tau) + [1 - f_2(\tau)] \ln [1 - f_2(\tau)]} + \frac{1}{\ln 2} \right\}, \quad (4.17)$$

где $f_2(\tau) = a\tau^\gamma$ и характеризует долю мест, занимаемых к моменту времени τ кинетическими единицами в процессе их беспорядочного блуждания на решетке;

α и γ – параметры материала, характеризующие скорость элементарного шага блуждания и влияние препятствий соответственно.

В уравнениях (4.16), (4.17)

$$m_1 = m_1^* \int_0^{\infty} T_1^*(\tau) d\tau; \quad m_2 = m_2^* \int_0^{\infty} T_2^*(\tau) d\tau,$$

где m_1^* – величина, характеризующая количество неоднородностей в образце;

$T_1^*(\tau)$, $T_2^*(\tau)$ – переменная часть ядер (4.16), (4.17);

m_2^* – величина, пропорциональная числу диффундирующих неоднородностей в материале.

Обработка релаксационных кривых асфальтобетонов и бетонов на органогидравлических вяжущих позволила установить, что в случае использования ядра релаксации $T_1(\tau)$ коэффициент корреляции r всегда выше, чем при использовании ядра $T_2(\tau)$. С рассматриваемых позиций это означает, что ход процесса релаксации лимитируется скоростью взаимодействия релаксаторов (например, скоростью слияния микрополостей и перехода их в нерелаксирующий материал).

Таким образом, в области линейной вязкоупругости для описания вязкоупругих свойств дорожно-строительных материалов рекомендуется использовать ядро $T_1(\tau)$.

Как уже было отмечено в настоящем разделе, поведение материалов под действием механических нагрузок в температурно-временном поле можно охарактеризовать количеством упругих связей n_y , вовлеченных в процесс деформирования. Рассмотрим закономерности поведения материалов различного состава и структуры при одинаковом n_y с привлечением зависимости (4.16).

Основной особенностью различных бетонов с одинаковым n_y является их равная релаксационная способность. Это вытекает из самого определения n_y . Если уравнение Больцмана-Вольтерра представить в виде

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_0} = 1 - \int_0^t T(\tau) d\tau; \quad (4.18)$$

$$\frac{E_t}{E_0} = 1 - \int_0^t T(\tau) d\tau, \quad (4.19)$$

то для материалов с одинаковым видом подынтегральных ядер выполнение условия

$$\frac{E_{t1}}{E_{01}} = \frac{E_{t2}}{E_{02}} \quad (4.20)$$

автоматически гарантирует выполнение и условия

$$\frac{\sigma_{t1}}{\sigma_{01}} = \frac{\sigma_{t2}}{\sigma_{02}}. \quad (4.21)$$

Действительно, если два разных материала подвергнуть мгновенной деформации ε , значения напряжений в каждом из них составят:

$$\sigma_{01} = \varepsilon E_{c1}; \quad \sigma_{02} = \varepsilon E_{c2}. \quad (4.22)$$

Через определенное время t напряжение в каждом из материалов достигнет уровня

$$\sigma_{t1} = \varepsilon E_{t1}; \quad \sigma_{t2} = \varepsilon E_{t2}. \quad (4.23)$$

Приняв в качестве показателя релаксационной способности отношение исходных напряжений к текущим, получим

$$\frac{\sigma_{01}}{\sigma_{t1}} = \frac{E_{c1}}{E_{t1}}; \quad \frac{\sigma_{02}}{\sigma_{t2}} = \frac{E_{c2}}{E_{t2}}. \quad (4.24)$$

Поскольку равенство правых частей вытекает из условия (4.17), будет соблюдаться и равенство отношения напряжений.

Если подставить в уравнение Больцмана подынтегральное ядро $T_1(\tau)$, получим

$$E(t) = E_0 + \frac{E_0 S_0}{k_b m k^*} \ln \frac{\ln(k^* t + \alpha_0) - 1}{\ln \alpha_0 - 1}. \quad (4.25)$$

Тогда для двух материалов с одинаковым n_y выражение (4.20) примет вид

$$\frac{A_1}{E_{01}} \ln \frac{\ln \frac{k_1^* t_1 + \alpha_0}{e}}{\ln \frac{\alpha_0}{e}} = \frac{A_2}{E_{02}} \ln \frac{\ln \frac{k_2^* t_2 + \alpha_0}{e}}{\ln \frac{\alpha_0}{e}}, \quad (4.26)$$

где

$$A = \frac{E_0 S_0}{k_b m k^*}.$$

Уравнение (4.26) имеет решение для любых времен, если выполняется условие

$$\frac{A_1}{E_{01}} = \frac{A_2}{E_{02}};$$

при этом

$$t_2 = \frac{k_2^*}{k_1^*} t_1. \quad (4.27)$$

Таким образом, материалы с одинаковым n_y имеют и одинаковое отношение тангенса угла наклона релаксационной прямой $\left(\frac{S_0}{mk_b} \right)$ в

координатах $\sigma_t/\sigma_0 - \int_0^t T^*(\tau) d\tau$ к константе скорости релаксации,

т.е. снижение тангенса угла наклона (замедление скорости релаксации) влечет за собой и снижение константы скорости релаксации на ту же величину.

Рассмотрим, в каких случаях материалы с одинаковым n_y будут наряду с одинаковой релаксационной способностью обладать одинаковой скоростью релаксации, то есть будут выполняться условия

$$\frac{E_{t1}}{E_0} = \frac{E_{t2}}{E_0}; \quad E'(t_1) = E'(t_2). \quad (4.28)$$

Продифференцировав выражение (4.26), получим

$$\frac{A_1}{\ln(k_1^* t_1 + \alpha_0) - 1} \cdot \frac{k_1^*}{k_1^* t_1 + \alpha_0} = \frac{A_2}{\ln(k_2^* t_2 + \alpha_0) - 1} \cdot \frac{k_2^*}{k_2^* t_2 + \alpha_0}. \quad (4.29)$$

Следовательно, условие (4.22) выполняется, если

$$A_1 k_1^* = A_2 k_2^* \text{ при } t_2 = \frac{k_2^*}{k_1^*} t_1. \quad (4.30)$$

В этом случае различные материалы будут иметь одинаковую временную и температурную чувствительность.

Для большинства дорожно-строительных материалов условие (4.30) выполняется не во всем диапазоне температур и времен воздействий.

Однако в большинстве случаев в температурном диапазоне $0 \dots -25^\circ\text{C}$ условие (4.30) выполняется. Это положение очень важно с точки зрения оценки работы в зоне низких температур.

Предложенные выкладки позволяют сделать следующий вывод. Независимо от состава и условий работы материалов дорожных покрытий существует зона с одинаковой релаксационной способностью и одинаковой температурно-временной чувствительностью. Эта зона может существовать без ограничений при выполнении условия (4.30). В остальных случаях существует только один температурно-временной интервал.

Наряду с изложенным материалы с одинаковым количеством вовлеченных в процесс деформирования упругих связей n_y имеют и другие особенности. В частности, при принудительном деформировании до одинакового уровня деформации материалы с одинаковым n_y сохраняют одинаковое соотношение между количеством рассеянной и накопленной энергии, а соотношение рассеянных энергий W_1/W_2 двух разных материалов с одинаковым n_y пропорционально их модулям, т.е.

$$W_1/W_2 = E_{r1}/E_{r2},$$

что легко доказывается теоретически при условии, что деформационные диаграммы имеют треугольную форму, а доля остаточной деформации ε_0 определяется

$$\varepsilon_0 = \varepsilon(1 - n_y), \quad (4.31)$$

где n_y – приложенная деформация.

Действительно, для треугольной диаграммы количество приложенной энергии будет $(E_t \varepsilon^2)/2$, а накопленной $(E_t \varepsilon^2 n_y)/2$.

Количество рассеянной энергии как разность приложенной и накопленной составит

$$W = 0,5\varepsilon^2 E_t (1 - n_y). \quad (4.32)$$

Тогда отношение рассеянной энергии к накопленной будет равно

$$(1 - n_y)/n_y.$$

Очевидно, что при одинаковом n_y разные материалы сохраняют одинаковое соотношение между рассеянной и накопленной энергией. Аналогично доказывается равенство

$$W_1/W_2 = E_{t1}/E_{t2} .$$

Количество рассеянной энергии для двух разных материалов можно определить

$$\begin{aligned} \Delta W_1 &= 0,5\varepsilon^2 E_{t1} (1 - n_{y1}); \\ \Delta W_2 &= 0,5\varepsilon^2 E_{t2} (1 - n_{y2}), \end{aligned} \tag{4.33}$$

где $E_{t1}, E_{t2}, n_{y1}, n_{y2}$ – соответственно модули и количество упругих связей первого и второго материалов.

Тогда

$$\frac{\Delta W_1}{\Delta W_2} = \frac{E_{t1} (1 - n_{y1})}{E_{t2} (1 - n_{y2})} . \tag{4.34}$$

Если $n_{y1} = n_{y2}$, получаем

$$\frac{\Delta W_1}{\Delta W_2} = \frac{E_{t1}}{E_{t2}} .$$

Материалы с одинаковым n_y имеют одинаковый коэффициент поперечной деформации [3]. Соотношение упругих и вязких связей определяет также механику деформирования и разрушения материала при постоянной скорости деформации.

В общем случае деформация состоит из линейной ее части, за которую ответственны упругие связи, и нелинейной, вызванной деформацией вязкопластических связей. Чем больше вовлекается вязкопластических связей, тем выше нелинейная составляющая. Когда n_y превышает 0,5, материал разрушается по линейной схеме; наблюдается и максимальный прирост прочности за счет создания вторичной структуры.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Структуру дорожно-строительных материалов целесообразно рассматривать как систему с комплексным набором упругих n_u и вязкопластических n_e связей. Удельное количество вязкопластических связей можно определить как отношение количества рассеянной энергии к накопленной в упругой стадии работы и выразить через соотношение фактического модуля или прочности с их максимально возможным значением при $n_u = 1$. Уровень $n_u = 1$ наблюдается при температурах механического стеклования независимо от прочности и деформативности составляющих. Количество упругих связей, вовлеченных в процесс деформирования, зависит от температуры, скорости деформации, состава материала.

2. Независимо от состава и структуры бетоны с равным количеством упругих (вязких) связей обладают одинаковой релаксационной способностью, скоростью релаксации, коэффициентом поперечной деформации, соотношением между количеством рассеянной и накопленной энергии, что обусловлено тем фактом, что при одинаковом n_u замедление скорости релаксации влечет за собой и снижение константы скорости релаксации на ту же величину. Такое положение является важнейшей особенностью поведения исследуемых материалов, что позволяет выработать новые подходы к анализу их свойств, оценке надежности и долговечности.

На основе полученных закономерностей перейдем к изучению методик определения коэффициентов запаса и уровней надежности материалов дорожных покрытий.

4.3. Методика оценки надежности материала покрытия по устойчивости к пластическим деформациям

4.3.1. Теоретические основы устойчивости покрытия к образованию пластических деформаций

Устойчивость материала к пластическим деформациям будет обеспечена, если в результате действия транспортной нагрузки при высоких летних температурах, когда несущая способность вязких связей минимальна, не будет происходить разрушение конденсационно-кристаллизационного каркаса (сплошных упругих связей) от действия растягивающих напряжений. Касательные напряжения

затем будут вызывать изменение формы материала и появление пластических деформаций. Следовательно, обеспечить работу композитного материала без появления остаточных деформаций можно при условии превышения прочности конденсационно-кристаллизационного каркаса материала над уровнем растягивающих напряжений, вызванных транспортной нагрузкой.

Рассмотрим двухзвеньевую модель композитного материала, состоящую из связей, образующих сплошной каркас n_{y1} , и дискретных упруговязких связей, доля которых составит $1 - n_{y1}$. Модуль упругости каркаса примем постоянным, соответствующим работе материала в упругой стадии $n_y = 1$, и обозначим через E_c ; соответственно модуль композита, зависящий от времени действия нагрузки и температуры, – через E_t .

Если к данной модели приложить напряжение σ , то

$$\sigma_k n_{y1} + \sigma_g (1 - n_{y1}) = \sigma, \quad (4.35)$$

где σ_k и σ_g – напряжения, воспринимаемые кристаллизационным каркасом и вязкопластической средой;

n_{y1} – удельное число связей, образующих кристаллизационно-конденсационный каркас.

С учетом того, что деформации упругой и вязкой фазы при отсутствии разрушений будут совпадать с деформацией композита,

$$\sigma_k / E_c = \sigma_g / E_g = \sigma / E_t. \quad (4.36)$$

Поскольку максимальное значение σ_k равно R_c , то, выполняя соответствующие преобразования, получаем

$$R_c n_{y1} = R_k \geq \sigma (E_c / E_t) \cdot n_{y1}. \quad (4.37)$$

Учитывая, что определенную долю напряжения воспринимает минеральный остов композита, а $n_{y1} = E_{\partial l} / E_c$, запишем (4.37) в виде

$$R_k^{mp} = (\sigma_p - \sigma_c \operatorname{tg} \varphi) (E_c / E_t) \cdot (E_{\partial l} / E_c), \quad (4.38)$$

где φ – угол внутреннего трения композита;

$E_{\text{дл}}$ – длительный модуль релаксации.

Значения σ_p и σ_c необходимо определять на контакте колеса с покрытием, что существенно усложняет задачу. Как математические, так и численные методы позволяют оценивать напряженно-деформированное состояние только на некотором удалении от точки приложения силы. В точке же контакта напряжение стремится к бесконечности.

С целью устранения данного несоответствия была решена контактная задача взаимодействия колеса с дорожным покрытием [24]. Сущность задачи состояла в принятии равенства сил, деформирующих колесо автомобиля и дорожное покрытие:

$$C_a V_1 = C_k V_2, \quad (4.39)$$

где C_k – жесткость колеса автомобиля, зависящая от конструкции шины, давления воздуха в ней и нагрузки на колесо;

C_a – жесткость композитного материала, зависящая от его реологических свойств;

V_1 и V_2 – объемы деформирования колеса и покрытия.

Комплексным показателем реологических свойств композита выступает модуль ползучести E_t , зависящий от температуры, напряжения и времени. Его значение можно определить по релаксационным кривым или кривым ползучести.

$$C_a = \frac{2rE_t}{1 - \mu^2}, \quad (4.40)$$

где r – радиус отпечатка колеса;

μ – коэффициент поперечной деформации.

В результате теоретических расчетов получено выражение для определения растягивающих напряжений на контакте колеса с покрытием [24]

$$\sigma_p = \frac{PC_k}{R \left(C_k + \frac{2rE_t}{1-\mu^2} \right)} \sqrt{\frac{\left(C_k + \frac{2rE_t}{1-\mu^2} \right)}{C_k} R^2 - x^2}, \quad (4.41)$$

где P – удельное давление от колеса автомобиля;

R – радиус расчетного колеса автомобиля;

x – расстояние от центра следа колеса до рассматриваемой точки.

Сжимающие и растягивающие напряжения зависят от вида расчетного автомобиля, жесткости верхнего слоя покрытия, жесткости расчетного колеса, условий движения. Анализ формулы (4.41) и характера изменения крутящего момента на колесах показал, что наиболее опасными являются участки приложения нагрузок к покрытию длиной 5...8 м от начала трогания с места на I передаче при максимальном открытии дроссельной заслонки (от 0,5 до 0,71) двигателя автомобиля и участки резкого торможения автомобиля на перекрестках и остановках длиной 15...25 м. Проведенные расчеты позволили получить графики сжимающих и растягивающих напряжений от колес автобуса "Икарус" и автомобиля МАЗ (рис. 4.5, 4.6).

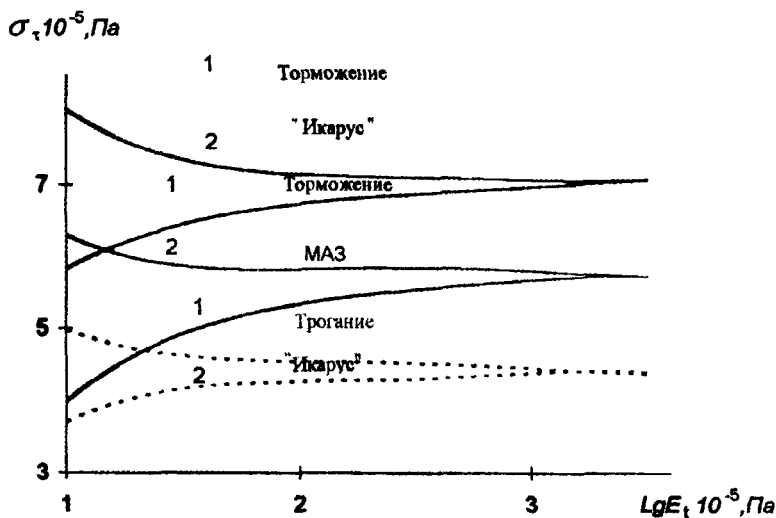


Рис. 4.5. Зависимость растягивающих напряжений в покрытии от его модуля: 1 – в передней точке контакта; 2 – в задней его точке

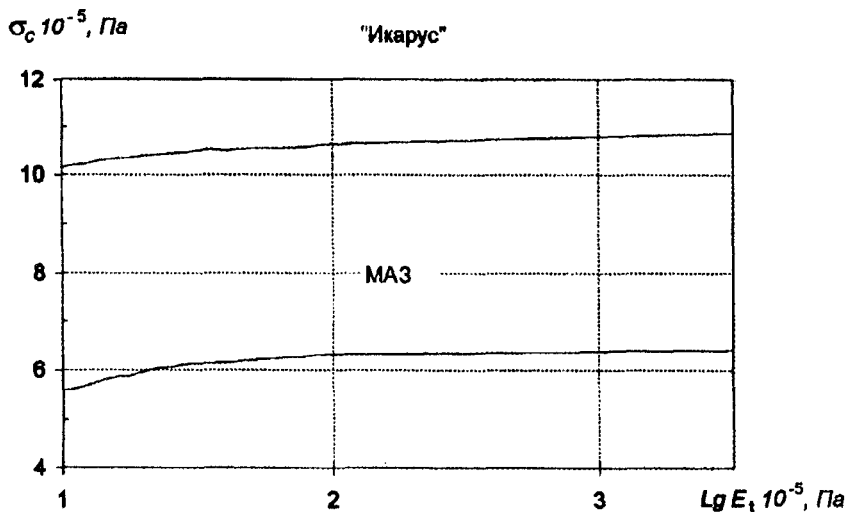


Рис. 4.6. Зависимость сжимающих напряжений в покрытии от его модуля

Из рисунков видно, что напряжение в передней точке контакта колеса с покрытием выше, чем напряжение в средней и задней точке. Кроме того, учет кривизны зоны контакта показывает, что с увеличением жесткости покрытия и радиуса кривизны контакта происходит выравнивание напряжений по всей зоне контакта.

Если материал применяют в нижних слоях покрытия, то для определения σ_p можно воспользоваться численными методами, в частности, методом конечных элементов (МКЭ) [25].

Применение МКЭ позволяет учесть градиент температур по толщине слоя, различие времени действия нагрузки в каждой точке слоя, анизотропию свойств материала. Для расчета напряженного состояния с учетом перечисленных факторов разработана модель, состоящая из 48 конечных элементов (КЭ). Слои дорожной одежды и конечные элементы жестко связаны между собой. Задача решается в пространственной постановке.

Обработка численных данных позволила построить номограмму, связывающую максимальные растягивающие напряжения в нижнем слое покрытия и деформационные характеристики материалов слоев (рис. 4.7) с учетом действия горизонтальной нагрузки, явления анизотропии и изменения свойств по толщине слоя.

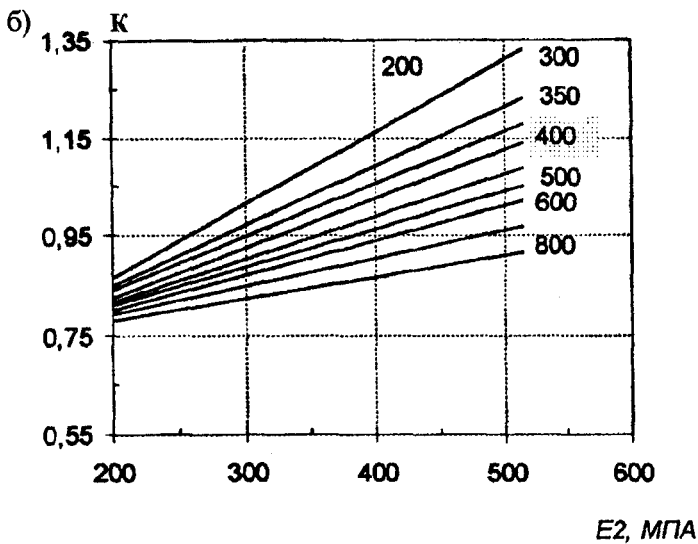
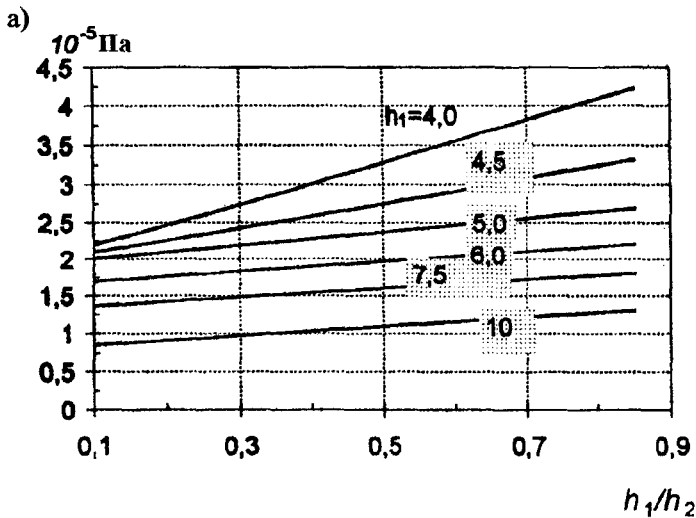


Рис. 4.7. Номограмма для определения максимального напряжения в нижнем слое

Методика пользования номограммой следующая:

1) по известному соотношению толщины слоев покрытия h_1 и нижнего слоя покрытия h_2 рассчитывают условное напряжение σ_1 ;

2) по соотношению модулей деформации для конкретных условий погружения E_1 и E_2 находят коэффициент K .

Значение максимального растягивающего напряжения вычисляют по условию

$$\sigma_p = \sigma_1 K . \quad (4.42)$$

В результате проведенных теоретических расчетов на основе данных экспериментов о свойствах материалов были получены усредненные значения напряжений в конструктивных слоях дорожной одежды (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Значения величин растягивающих и сжимающих напряжений

Вид напряжения	Верхний слой		Нижний слой	
	участок перегона	участок торможения	участок перегона	участок торможения
Растягивающее	0,5	0,65	0,27	0,37
Сжимающее	1,0	1,0	0,67	0,67

Представленные в таблице данные являются максимальными для расчетного автомобиля группы А. Используя данные значения, можно производить расчеты по оценке устойчивости материалов пластическим деформациям.

4.3.2. Методика оценки надежности покрытия по сопротивлению пластическим деформациям

Перейдем к определению коэффициентов запаса из условия сопротивления пластическим деформациям. За основу примем зависимость (4.38). Если учесть, что прочность конденсационного каркаса соответствует значению истинного предела пластичности с реологической точки зрения или коэффициенту удельного сцепления в законе Кулона, зависимость (4.38) можно представить в виде

$$C = (\sigma_p - \sigma_c \operatorname{tg} \varphi) E_{\text{дл}} / E_t . \quad (4.43)$$

Для доведения зависимости (4.43) до практического пользования необходимо уточнить некоторые положения:

1. Совпадает ли значение истинного предела пластичности и коэффициента удельного сцепления?

2. Совпадают ли значения максимального растягивающего и сжимающего напряжений в расчетном сечении?

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что вышеуказанные положения для материалов дорожных покрытий не выполняются.

Коэффициент удельного сцепления зависит от температурно-временных факторов. Его соотношение с пределом пластичности составляет 0,09...0,1. В точке максимума растягивающих напряжений сжимающие составляют около 40% от максимума.

С учетом изложенного коэффициент запаса можно представить в виде

$$K_{nl} = \frac{CK}{(\sigma_p - m \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \sigma_c)}, \quad (4.44)$$

где K – коэффициент, учитывающий соотношение длительного и фактического модуля релаксации и несовпадение коэффициента удельного сцепления с истинным пределом пластичности, равный 0,7;

m – коэффициент, учитывающий несовпадение максимального сжимающего и растягивающего напряжений в расчетном сечении, равный 0,4.

4.4. Методика оценки уровня надежности материала покрытий по устойчивости к температурным трещинам

Общепризнанно, что температурная трещиностойкость будет обеспечена, если возникающие напряжения с учетом релаксационной способности не превышают длительной прочности [6], [7] и др. Однако определение релаксационных функций и закономерностей изменения долговременной прочности материала связано с большими трудностями, требует высокой точности эксперимента и квалифицированного персонала. Поэтому целесообразно разработать критерий, который был бы достаточно простым и в то же время учитывал свойства материала и условия его работы.

Основным фактором, влияющим на трещиностойкость, является релаксационная способность. Поэтому, если материалы в расчетных условиях имеют близкую релаксационную способность, близкой будет и их трещиностойкость. Инвариантным параметром близости релаксационной способности различных материалов может служить число упругих связей n_y . Как было показано в параграфе 4.2, одинаковое n_y обеспечивает одинаковую релаксационную способность.

Условие трещиностойкости представим в виде

$$\sigma_m \leq R_c \Psi, \quad (4.45)$$

где σ_m – температурные напряжения в слое покрытия;

R_c – предельная структурная прочность;

Ψ – уровень повреждаемости материала вследствие повторных воздействий неоднородности структуры и т.д.

Если известен релаксационный модуль E_i , то

$$\sigma_m = E_i \varepsilon = E_c n_y \varepsilon, \quad (4.46)$$

где ε – температурная деформация;

E_c – максимальный модуль;

n_y – доля упругих связей, соответствующая расчетным условиям.

Рассмотрим два материала, обладающих одинаковым n_y при расчетных условиях и характеризующихся некоторыми значениями $R_{c1}, R_{c2}, E_{c1}, E_{c2}$. Для каждого из них определим σ_m :

$$\sigma_{m1} = E_{c1} n_y \varepsilon; \quad \sigma_{m2} = E_{c2} n_y \varepsilon. \quad (4.47)$$

Величины R_c и E_c взаимосвязаны (см. разд. 4.2.), причем с ростом E_c значение R_c увеличивается более интенсивно. Для упрощения анализа примем зависимость между R_c и E_c линейной. Тогда

$$R_{c1}/R_{c2} = E_{c1}/E_{c2}. \quad (4.48)$$

Значение уровня повреждаемости Ψ зависит от количества рассеянной энергии, которое связано с количеством отрелаксировав-

ших напряжений [3]. Поскольку рассматриваемые материалы имеют одинаковую релаксационную способность, то

$$\Psi_1 = \Psi_2 = \Psi. \quad (4.49)$$

Два материала будут одинаково трещиностойкими, если у них одинаковое отношение $R_c\Psi/\sigma_m$. Для одного материала

$$R_c\Psi/\sigma_m = (R_{c1}\Psi)/(\varepsilon E_{c1}n_y). \quad (4.50)$$

Для второго с учетом проведенных выше преобразований

$$R_c\Psi/\sigma_m = \frac{R_{c2}\Psi}{\varepsilon E_{c2}n_y} = \frac{R_{c1}E_{c2}/E_{c1}\Psi}{\varepsilon E_{c1}E_{c2}/E_{c1}n_y}. \quad (4.51)$$

Оба выражения тождественны. Это подтверждает положение, что материалы с одинаковым n_y обладают одинаковой трещиностойкостью при одинаковых значениях коэффициента температурного расширения. Следовательно, в качестве инвариантного критерия трещиностойкости можно принять долю упругих связей n_y , вовлеченных в процесс деформирования при расчетных условиях.

Данный метод можно использовать, если известно требуемое значение n_y из условия трещиностойкости.

В настоящее время достаточно полно разработаны критерии и требования к асфальтобетону. Следовательно, если известно значение n_y , обеспечивающее трещиностойкость асфальтобетона, его можно применить и к другим композиционным материалам. В этом случае критерием может служить, например, отношение прочности при 0°C к предельной структурной прочности. Тогда уровень надежности определяется отношением прочностей R_0 и R_c для асфальтобетона и композитного материала

$$K_2 = \frac{(R_0/R_c)^{a/6}}{(R_0/R_c)^{км}}. \quad (4.52)$$

Экспериментальные исследования позволили установить, что для условий РБ отношение R_0/R_c должно быть не более 0,3 для покрытий и не более 0,5 для нижних слоев.

Условие (4.52) можно применять в том случае, если n_y , определенные как R_0/R_c и R_p/R_c для эталонного материала и композита, будут совпадать. Такое допущение можно принять, т.к. температура стеклования композита и базового материала отличается несущественно, а значения коэффициента приведения будут одинаковыми, поскольку одинаково n_y .

Для того, чтобы пользоваться зависимостью (4.52) на практике, необходимо иметь простую методику определения предельной структурной прочности (R_c).

Если испытание образцов производить при температуре 0°C и скоростях деформации 3 и 10 мм/мин, а также выразить n_y как отношение средней прочности к R_c , зависимость (4.14) трансформируется к виду

$$R_c = \frac{\bar{R} \lg(V_1/V_2)}{\lg(V_1/V_2) - \lg(R_1/R_2)} = \frac{\bar{R}}{1 + 1,92 \lg R_1/R_2}, \quad (4.53)$$

где \bar{R} – среднее значение прочности на растяжение при 0°C и скоростях деформации 3 и 10 мм/мин;

R_1 и R_2 – прочность на растяжение при 3 и 10 мм/мин соответственно.

На практике коэффициент запаса и уровень надежности материала покрытия из условия температурной трещиностойкости определяются следующим образом.

Готовят девять образцов-цилиндров асфальтобетона. Три образца испытывают на прочность при растяжении по образующей цилиндра при температуре 273 К и скорости деформации 3 мм/мин, остальные – при той же температуре и скоростях деформации 3 и 10 мм/мин. Затем по (4.53) вычисляют предельную структурную прочность и индекс трещиностойкости:

$$I_m = R_0/R_c. \quad (4.54)$$

Значение I_m должно быть не более 0,3 в верхнем слое покрытия и 0,5 – в нижнем.

В табл. 4.2 представлены экспериментальные данные по сравнению критериев трещиностойкости бетонов на органогидравлических вяжущих разного состава.

Как видно из данных таблицы, соотношение R_0/R_c хорошо коррелирует с релаксационной способностью материала и данными кинетических характеристик.

Таблица 4.2

Влияние состава бетона на критерии трещиностойкости

Содержание цемента в структуре бетона, полученного горячим способом	Критерий трещиностойкости		
	R_0/R_c	E_t , МПа	$P_1/P_2 \cdot 10^5$
Асфальтобетон с добавкой 5 % цемента	0,24	350	41
То же 10 % цемента	0,3	410	35
То же 15 % цемента	0,5	700	20

Примечание. E_t – модуль релаксации при -10°C и времени 60 минут; P_1/P_2 – соотношения кинетических характеристик по А. М. Богуславскому при -10°C .

4.5. Методика оценки уровня надежности по устойчивости к усталостным трещинам

Не прибегая к подробному анализу исследований по циклической долговечности, изложенных в [26] – [28], отметим, что для бетонов дорожных покрытий, хоть и в довольно узком диапазоне, может быть использована зависимость вида

$$N_{np} = (R/\sigma)^n, \quad (4.55)$$

где R – прочность материала, определяемая при температуре и скорости нагружения, соответствующих действию σ ;

n – коэффициент, зависящий от структуры материала.

При работе материала в упругой стадии ($n_y \rightarrow 1$) его прочность равна R_c . Поскольку число циклов до разрушения зависит от отношения σ/R , то чем выше R_c , тем больше будет и N_{np} в упругой ста-

дии работы. Кроме того, чем выше R_c , тем больший уровень повреждаемости в материале может быть достигнут на момент разрушения, так как критический уровень повреждаемости зависит от отношения σ/R . Следовательно, значение R_c может служить критерием циклической долговечности при постоянном напряжении в упругой стадии работы.

В табл. 4.3 приведены значения экспериментальных данных циклической долговечности композитных материалов при разном R_c . Из них следует, что несмотря на более низкую прочность материала при стандартных условиях испытания рост R_c ведет к увеличению N , что подтверждает высказанные положения.

Таблица 4.3

Значения циклической долговечности материалов
с разным уровнем R_c

Количество битума в составе бетона	Прочность при 20°C, МПа		Предельная структурная прочность, МПа	Предельное число циклов до разрушения
	на сжатие	на растяжение		
6	2,7	1,4	7,0	$4 \cdot 10^4$
8	2,5	1,5	9,5	$6 \cdot 10^4$
12	2,0	1,0	12,0	$1,1 \cdot 10^5$
14	1,4	0,8	14,0	$4 \cdot 10^5$

Уровень напряжения при циклической нагрузке составлял 0,1 МПа.

Если режим нагружения соответствует работе материала в вязкой стадии ($n_y \rightarrow 0$), то более высокую циклическую долговечность имеют материалы, способные рассеять до разрушения большее количество энергии W_p . Поскольку W_p коррелируется с величиной максимальной деформации ε_n , реализуемой в широком диапазоне температур и скоростей нагружения, в качестве критерия циклической долговечности можно принять ε_n . Работа материала в вязкой стадии наблюдается при протекании релаксационных процессов, ползучести и т.п.

Поскольку увеличение R_c повышает вероятность роста долговечности в упругой стадии работы, а увеличение ε_n – в вязкой ста-

дии, то в общем случае ($0 < n_y < 1$) максимальной циклической долговечностью будут обладать материалы, имеющие максимальное значение выражения $R_c \varepsilon_n$.

Установлено, что циклическая долговечность зависит от уровня напряжения и температуры, которые связаны с удельным количеством упругих связей n_y . В упругой стадии работы более высокой усталостной долговечностью обладают материалы, имеющие максимальное значение предельной структурной прочности R_c , а в вязкоупругой – максимальное значение $R_c \varepsilon_{np}$.

Тогда в первом случае коэффициент запаса можно вычислить из условия

$$K_z = R_c^\phi / R_c^{mp}, \quad (4.56)$$

где R_c^ϕ – фактическая предельная структурная прочность;

R_c^{mp} – требуемое значение предельной структурной прочности, зависящее от условий работы материала.

Во втором случае

$$K_z = \left[\frac{R_c^\phi}{R_c^{mp}} n_y \right] \left[\frac{\varepsilon_n^\phi}{\varepsilon_n^{mp}} (1 - n_y) \right], \quad (4.57)$$

где ε_n^ϕ – фактическая предельная деформация;

ε_n^{mp} – требуемая деформация в гамме исследованных составов;

n_y – количество упругих связей в режиме работы материала в дорожной конструкции.

Конкретный выбор критерия на практике будет зависеть от объема выполненных исследований и необходимой точности. В большинстве случаев можно принять более простой критерий по (4.56).

Требуемое значение предельной структурной прочности зависит от условий работы материала (вида конструктивного слоя) и интенсивности движения (категории дороги) и может быть принято 3,5; 3,0; 2,5; 2,0 МПа для дорог I, II, III, IV категорий соответственно.

Для практической реализации методики достаточно определить величину предельной структурной прочности по формуле (4.53) и вычислить коэффициент запаса по (4.56).

4.6. Методика оценки уровня надежности по коррозионной стойкости

Изменение свойств материалов под действием попеременного замораживания и оттаивания позволяет оценить степень их надежности в дорожной одежде, сопоставить и вычислить достоинства и недостатки по сравнению с широко применяемыми аналогичными материалами.

Коэффициент запаса по условиям коррозионной стойкости определяется по формуле

$$K_k = K_\phi / K_{mp}, \quad (4.58)$$

где K_ϕ – фактический коэффициент морозостойкости;

K_{mp} – требуемый коэффициент.

Коэффициент морозостойкости вычисляется как отношение прочности материала после определенного числа циклов замораживания-оттаивания к исходной.

Для определения фактического коэффициента морозостойкости оценивают прочность материала после 25 циклов замораживания-оттаивания в агрессивной среде (5%-ный раствор поваренной соли) и соотносят ее с эталонной прочностью (образцы без замораживания-оттаивания).

Требуемый коэффициент морозостойкости был получен путем наблюдения за состоянием опытных участков дорожных покрытий г. Минска. Установлено, что K_{mp} должно находиться в пределах 0,8.

В дальнейшем зависимость (4.58) должна быть уточнена с учетом влияния транспортной нагрузки и изменения свойств материала во времени.

Критерий надежности по коррозионной стойкости может быть дополнен уровнем надежности по деструкции под действием погодноклиматических факторов во времени (старению). В этом случае определяют коэффициент K_5 , представляющий собой отноше-

ние фактической степени деструкции к допустимой. Учет данного фактора позволяет также предсказывать развитие деформаций во времени, а следовательно, осуществлять прогноз межремонтных сроков. Однако с учетом того, что для определения степени деструкции требуются рентгенографические аппараты, в большинстве случаев достаточно четырех вышеприведенных критериев.

После определения частных уровней надежности по формуле (1.27) вычисляют общий уровень надежности материала покрытия и делают соответствующее заключение о сроках службы и ремонта.

5. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

5.1. Материаловедческие пути повышения надежности дорожных покрытий

Как и в случае дорожных одежд, пути повышения надежности дорожных покрытий можно разделить на *материаловедческие* и *конструкционные*. К материаловедческим можно отнести:

- 1) совершенствование методики подбора составов;
- 2) улучшение качества исходных материалов;
- 3) совершенствование технологии приготовления смесей и строительства покрытий;
- 4) применение новых эффективных материалов и технологий.

5.1.1. Совершенствование методики подбора составов

Состав материалов дорожных покрытий является многокомпонентным и включает: щебень, песок (природный и искусственный), минеральный порошок, вяжущее, различные добавки. На основе данных исходных компонент можно подобрать несколько тысяч составов, удовлетворяющих требованиям действующих стандартов. Однако каждый из этих составов будет иметь свои преимущества и недостатки.

Структуру материала дорожного покрытия можно считать оптимальной, если она имеет максимальную надежность по всем факторам внешнего воздействия (сдвиго- и трещиностойкости, морозостойкости, усталости). То есть, подбирая состав, мы должны оценивать частные и общие уровни надежности по методике разд. 4, а затем вычислять об-

щий уровень надежности. Состав с максимальным общим уровнем надежности и будет оптимальным. При этом частные уровни надежности должны быть не меньше проектного.

На практике подобная методика реализуется следующим образом:

1. Задаются граничные значения исходных компонент: содержание щебня (от и до), вязкость битума (например, с пенетрацией от 40 до 100°), соотношение природного и искусственного песков, количество битума, добавок и т.д.

2. Составляется матрица планирования эксперимента, например, по методике [2].

3. Для каждой из точек матрицы планирования готовятся образцы и проводятся их испытания.

4. По методике разд. 4 вычисляются частные и общий уровни надежности в каждой опорной точке.

Используя соответствующие методы математической обработки, выбирают составы с максимальным уровнем надежности, например, путем построения графиков (рис. 5.1, 5.2). Как видно из данных рисунка, оптимальным является состав, содержащий 20% отсева, 5% битума с пенетрацией 75 градусов.

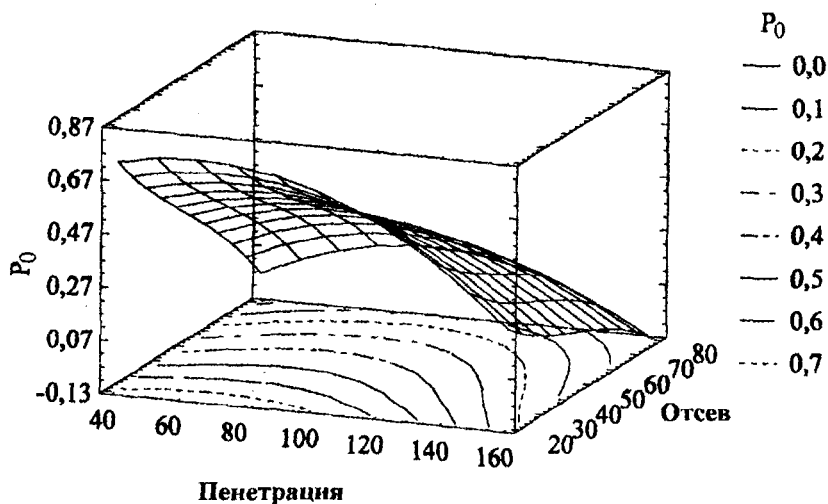


Рис. 5.1. Зависимость общего уровня надежности асфальтобетона от вязкости битума и содержания отсева

Щебень - 45 %, отсев - 20 %, МР - 5 %

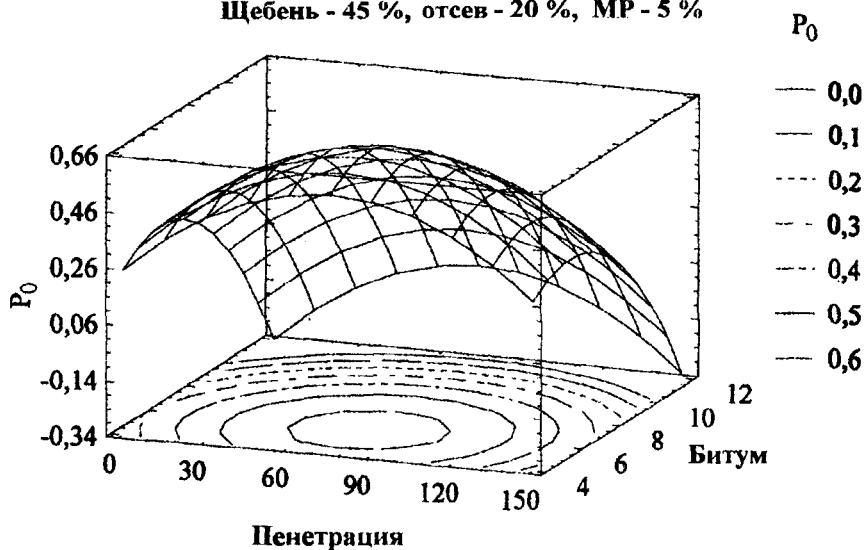


Рис. 5.2. Зависимость общего уровня надежности асфальтобетона от вязкости и количества битума

5.1.2. Улучшение качества исходных материалов и технологии приготовления смесей

Качество материалов дорожных покрытий во многом определяется качеством составляющих их компонентов. К исходным компонентам можно отнести: крупный заполнитель (щебень), мелкий заполнитель (песок), структурирующие добавки (минеральный порошок), вяжущие.

Качество щебня определяется его формой, размерами, состоянием (чистотой) поверхности, прочностью.

С целью оценки влияния формы щебня были выполнены исследования надежности асфальтобетона на щебне двух видов:

- 1) кубовидном щебне, полученном на дробилке «Parker»;
- 2) щебне ПО «Гранит» с содержанием лещадных частиц 35 % .

Оказалось, что кубовидный щебень в 1,3... 1,5 раза увеличивает надежность по устойчивости к колесобразованию (рис. 5.3).

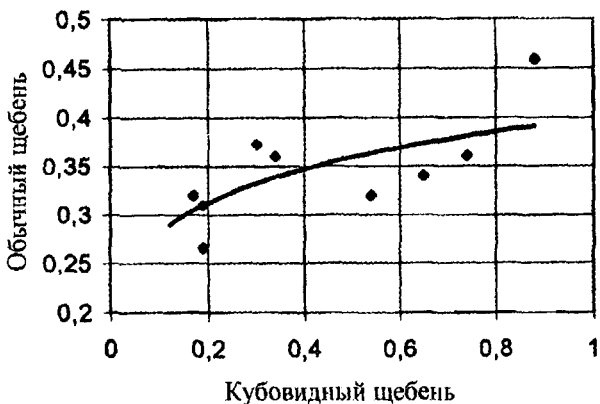


Рис. 5.3. Зависимость уровня надежности по устойчивости к пластическим деформациям асфальтобетона на кубовидном и обычном щебне (при их одинаковом содержании в смеси)

По уровню надежности по коррозионной стойкости эффекта не обнаружено. Это приводит к сохранению общего уровня надежности практически на одном уровне, что связано, по-видимому, с меньшей шероховатостью зерен кубовидной формы и снижением адгезии.

Количественное содержание щебня по-разному сказывается на величине частных и общего уровня надежности. С увеличением содержания щебня растет уровень надежности по устойчивости к пластическим деформациям и температурным трещинам (рис. 5.4). Однако наблюдается падение устойчивости к усталостным трещинам и коррозии (рис. 5.5), причем это падение настолько большое, что общий уровень надежности с увеличением количества щебня более чем на 30% неуклонно снижается. Такая ситуация требует правильного подхода к применению многощебенистых бетонов в дорожной одежде путем проведения определенных конструктивных мероприятий (см. 5.2).

Мелкодисперсная фракция в асфальтобетоне занимает более 80 % удельной поверхности, поэтому от ее качества во многом зависит надежность асфальтобетона.

В настоящее время в составе асфальтобетонных смесей используются гранитные отсе́вы и доломитовые минеральные порошки. Для изучения влияния соотношения этих компонентов на коррозионную стойкость были исследованы уровни надежности по данному показателю.

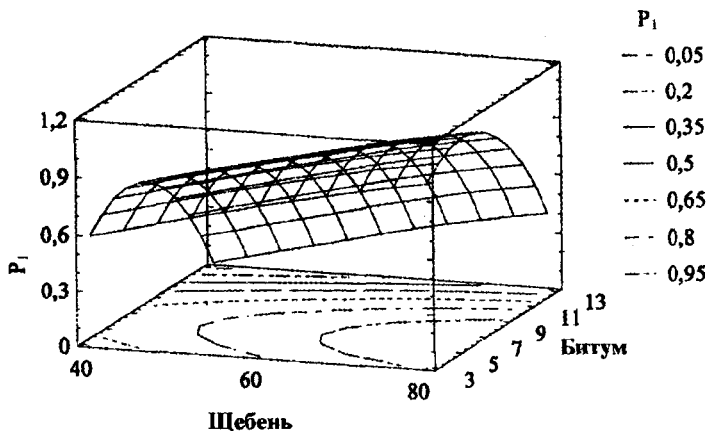


Рис. 5.4. Зависимость уровня надежности по устойчивости к пластическим деформациям от содержания щебня

Отсев - 20 %, пенетрация - 80 %, МР - 2 %

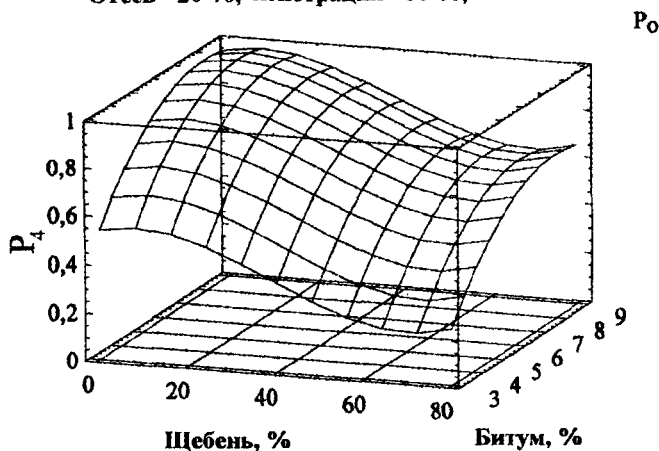


Рис. 5.5. Зависимость уровня надежности по коррозионной стойкости от содержания щебня

Установлено, что ввод пылеватых фракций может привести к снижению коррозионной стойкости. Особенно резкое ее падение наблюдается при содержании минерального порошка 4...5 % и отсева 10...20 %, что соответствует как раз наиболее распространенным составам в РБ (рис. 5.6). Это явление обусловлено агрегирова-

нием пылеватых частиц. При увеличении количества минерального порошка выше оптимального предела в системе минеральный порошок – вяжущее появляется воздушная фаза, увеличивается пористость, битума не хватает для обволакивания минеральных зерен, появляются контакты по твердой поверхности.

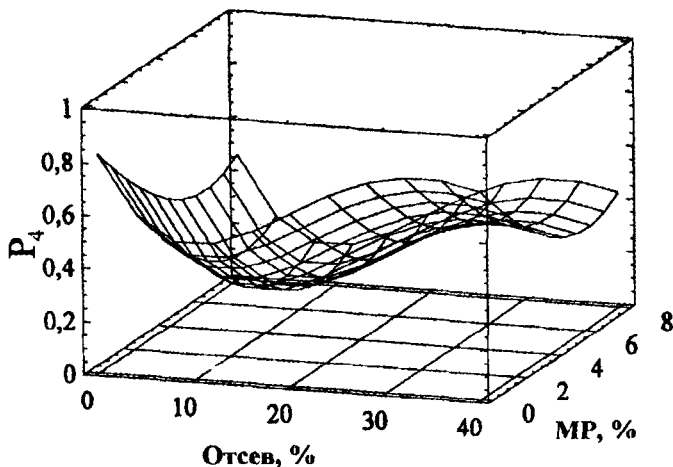


Рис. 5.6. Зависимость уровня надежности по коррозионной стойкости от содержания отсева и минерального порошка

Наличие частиц доломита, имеющих знак «+», и гранита со знаком «-» приводит к усилению агрегирования пылеватых частиц.

С целью ликвидации этих негативных явлений было решено заменить доломитовый минеральный порошок цементом.

Исследования показали, что ввод цемента увеличивает коррозионную стойкость независимо от количества отсева (рис. 5.7). Это обусловлено процессами гидратации цемента, которые приводят к омоноличиванию флокул, прорастанию кристаллов в битумные пленки и росту адгезии. Таким образом, путем замены доломитового порошка цементом можно добиться существенного увеличения уровня надежности по коррозионной стойкости.

Наряду с видом и состоянием тонкодисперсных наполнителей асфальтобетонных смесей существенное влияние оказывает и технология ввода различных наполнителей. Известно, что при предварительном смешении порошка и битума существенно повышается и качество асфальтобетона [29].

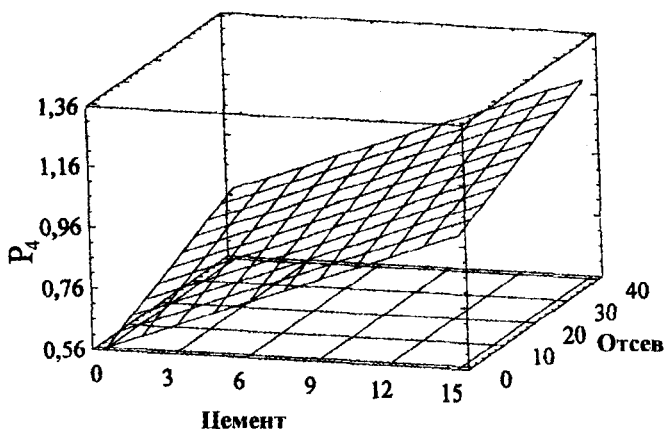


Рис. 5.7. Зависимость уровня надежности по коррозионной стойкости от содержания отсева и портландцемента

В связи с этим было проверено четыре технологических варианта получения смеси:

- 1) после сухого перемешивания щебня, песка, отсева, минерального порошка добавлялся битум, и смесь перемешивалась;
- 2) после перемешивания щебня, песка и битума добавлялся отсев, минеральный порошок, и смесь перемешивалась;
- 3) после перемешивания щебня, песка, отсева и битума добавлялся минеральный порошок, и смесь перемешивалась;
- 4) после сухого перемешивания щебня, песка, отсева и цемента добавлялся битум, и смесь перемешивалась.

Состав смеси был одинаков, кроме четвертого варианта (с добавлением цемента).

Составы 1 – 3:

- 1) щебень (5...20 мм) – 30 %;
- 2) щебень (5...10 мм) – 25 %;
- 3) отсев – 21 %;
- 4) песок – 17 %;
- 5) минеральный порошок – 7 %;
- 6) битум – 5,6 %.

Состав 4:

- 1) щебень (5...20 мм) – 30 %;
- 2) щебень (5...10 мм) – 25 %;
- 3) отсеб – 22 %;
- 4) песок – 18 %;
- 5) цемент – 5 %;
- 6) битум – 5,6 %.

Образцы были подвергнуты циклическому замораживанию-оттаиванию с последующим определением R_4 (уровня надежности по коррозионной устойчивости) и $R_{общ}$.

На рис. 5.8 представлена диаграмма, отражающая зависимость R_4 от технологии ввода и вида наполнителя.

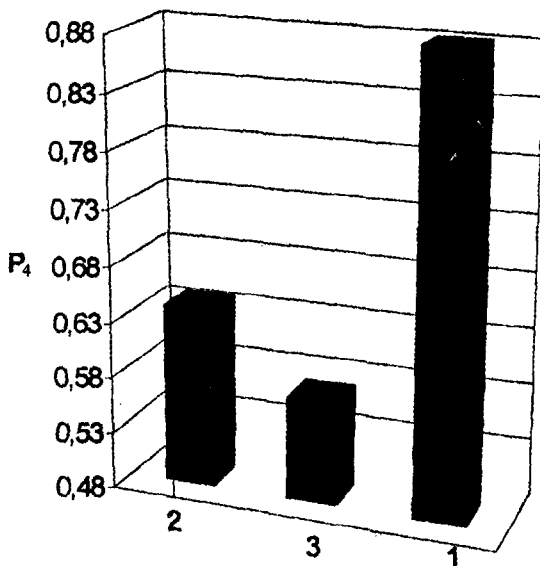


Рис. 5.8. Зависимость уровня надежности по коррозионной стойкости от технологии ввода наполнителя:

- 1 – смеси с добавками цемента; 2 – смесь, изготовленная по варианту 1;
3 – смесь, изготовленная по варианту 2

Как видно из данных рисунка, наибольший эффект имеют смеси с цементом; на втором месте – смесь, изготовленная по варианту 3, на третьем – по варианту 1.

Подобная тенденция сохранилась и при оценке $P_{\text{общ}}$ (рис. 5.9).

Таким образом, для практической реализации можно рекомендовать технологии ввода по варианту 3 и 4.

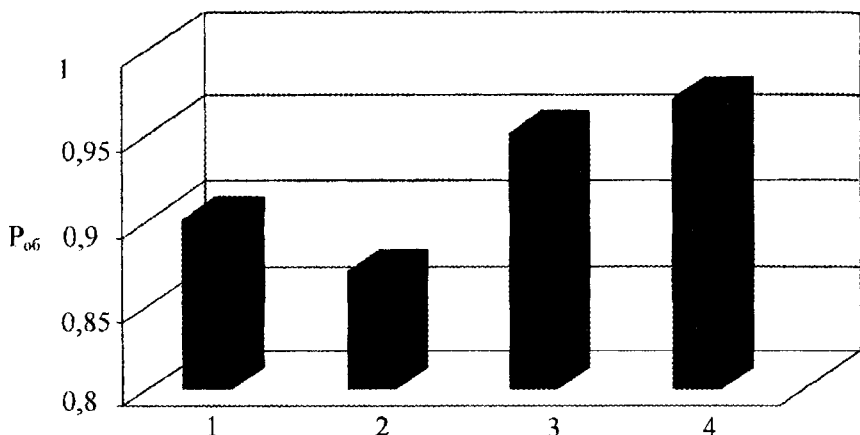


Рис. 5.9. Зависимость общего уровня надежности асфальтобетона от технологии ввода наполнителя (цифры внизу – варианты приготовления смесей)

Для того, чтобы изучить влияние вида битума и его количества на надежность покрытия, было изготовлено 52 состава опорных смесей, где варьировались количество щебня, отсева, минерального порошка, битума и свойства битума.

Для каждого состава оценивались уровни надежности. Установлено, что общий уровень надежности асфальтобетона растет с ростом вязкости и количества битума (рис. 5.10), что объясняется увеличением уровня надежности по сопротивлению коррозии, усталостным и в определенной степени – пластическим деформациям. Но максимальная вязкость ограничивается требованиями температурной трещиностойкости и предотвращения старения битума. Анализ уровня надежности асфальтобетона по температурной трещиностойкости показал, что максимальную вязкость битума следует ограничить пенетрацией в 70 градусов (рис. 5.11).

Таким образом, оптимальная вязкость битума в условиях РБ составляет 70 градусов пенетрации.

Щебень - 62 %, отсеv - 35 %, МР - 1 %

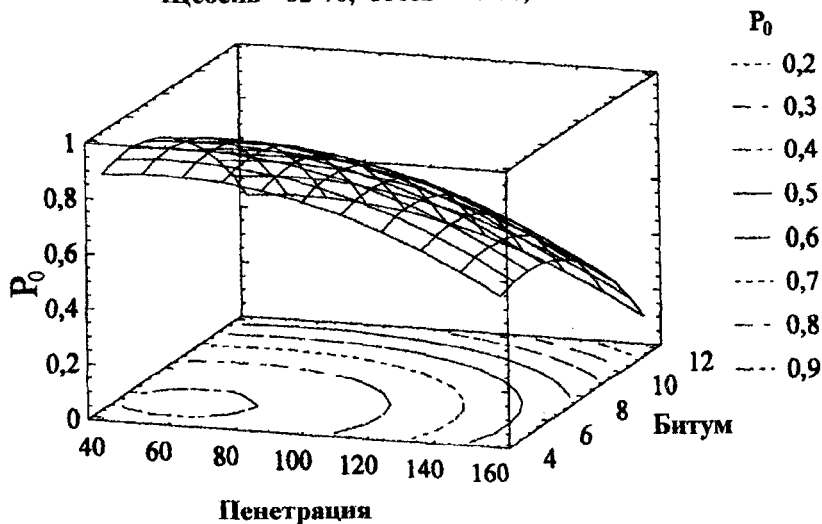


Рис. 5.10. Зависимость общего уровня надежности от вязкости и количества битума

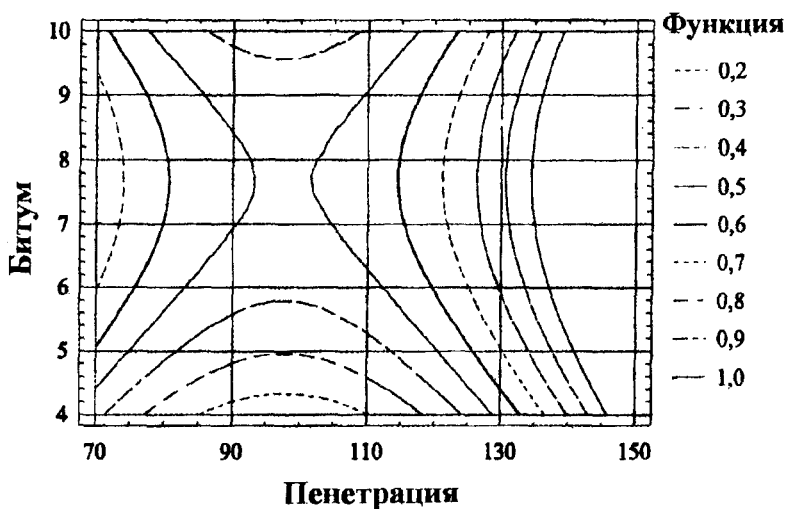


Рис. 5.11. Зависимость уровня надежности по температурной трещиностойкости от вязкости и количества битума

5.1.3. Применение новых эффективных материалов и технологий

К новым материалам, обеспечивающим повышение надежности дорожных покрытий, можно отнести:

- 1) асфальтобетоны на модифицированных битумах;
- 2) бетоны на композиционных – органиогидравлических – вяжущих;
- 3) асфальтобетоны на битумах повышенной вязкости и твердых битумах;
- 4) щебеночно-мастичные асфальтобетоны.

Модифицированные дорожные битумы – это битумы, содержащие различное количество добавок в виде полимеров – веществ, молекулы которых состоят из большого числа повторяющихся звеньев (к ним относятся пластмассы, каучуки, резины, смолы). Высокмолекулярные полуфабрикаты, из которых получают полимеры, называются олигомерами. Модифицированные битумы отличаются рядом положительных свойств: более широкий интервал пластичности, пониженная температура хрупкости, эластичность и т.д.

Имеющаяся обширная литература по модификации дорожных битумов полимерами позволяет выделить в мировой практике следующие крупные блоки способов улучшения битумов [30] – [32]:

- 1) битумы + ЭВА (этиленвинилацетат);
- 2) битумы + СБС (стиролбутадиенстирол);
- 3) резинобитумы;
- 4) латексные битумы;
- 5) полиолефиновые битумы;
- 6) битумы + эпоксидные смолы;
- 7) серобитумы.

Если проанализировать применение полимеров для модификации битумов в мировой практике, складывается следующая ситуация:

СБС (кратон) – 61 % всего мирового потребления.

СБ (стирельф – диблок стирола и бутадиена) – 14 %. Использование возможно при вводе в битум 5...10 % серы, что усложняет технологию и создает экологические проблемы (применяется, в основном, во Франции).

ЕВА (этилвинилацетат) – 19 %. Единственный из всей гаммы полимеров, способный, как и СБС, создавать пространственную сетку (но жесткость этой сетки намного выше, что неблагоприятно сказывается на хрупкости полимербитумных вяжущих).

Бетопласт (этиленпропилен сополимер) – 3 %.

Новофлет (полиэтилен) – 3 %.

Битумополимерные вяжущие на основе сополимеров (СБС) типа кратон – это двухфазные системы, образованные средой битума и нерастворимым в ней стиролом.

Поведение двухфазной системы на твердой подложке (в асфальтобетоне) будет иметь существенные отличия от поведения самого вяжущего в связи с тем, что макромолекулы стирола, обладая более высокой энергией, будут адсорбироваться на твердой поверхности в первую очередь.

Адсорбированные макромолекулы претерпевают конформацию, что ведет к изменению подвижности. Чем выше энергия адсорбции, тем меньше длина петли и больше доля связанных сегментов. Следовательно, можно полагать, что на крупных частицах асфальтобетонных смесей молекулы стирола будут сохранять достаточную гибкость и подвижность, на мелких же частицах может произойти потеря молекулярной подвижности, а следовательно, и потеря модифицирующего эффекта полимербитумного вяжущего. Таким образом, должна существовать минимальная толщина битумной пленки, при которой заметен эффект модификации. Если толщина пленки окажется меньше оптимальной, эффект модификации может исчезнуть.

Экспериментальные исследования показали, что при высоких температурах эффект прироста прочности за счет модификации заметен при толщине пленки не менее 8 мкм. При смещении в область отрицательных температур эффект от модификации по прочности, усталости, трещиностойкости заметен при толщине пленки не менее 10 мкм (рис. 5.12, 5.13). Характерно, что в области низких температур ввод СБС без пластификатора практически не дает эффекта (рис. 5.13).

Следовательно, при подборе составов асфальтобетонов на модифицированных эластомерами битумах средняя толщина битумной пленки должна быть не ниже 10 мкм. На практике это требует увеличения содержания щебня и снижения на 30...40 % минерального порошка. Расход битума по сравнению с обычным асфальтобетоном следует увеличить на 10...15 %.

Бетоны на композиционных органогидрравлических вяжущих (ОГВ) – это искусственные строительные материалы, сочетающие в своей структуре свойства термодинамически несовместимых орга-

нических (битумов, дегтей) и гидравлических (цемент, гипс, зола и т.д.) вяжущих. Такие бетоны могут быть трех видов.

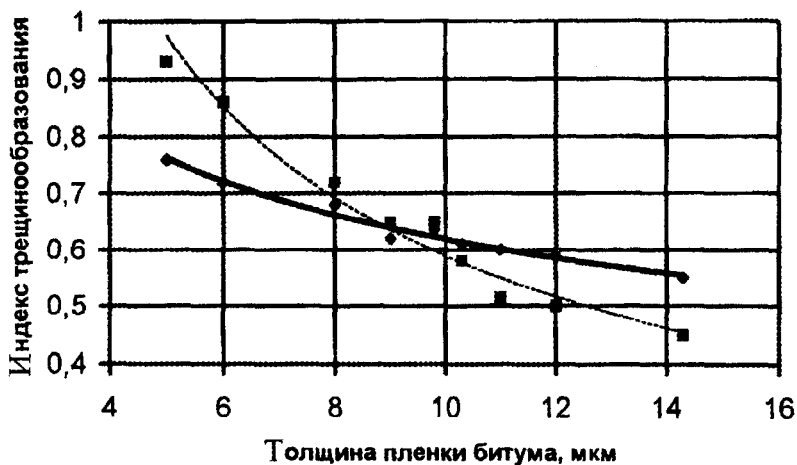


Рис. 5.12. Зависимость индекса трещиностойкости от толщины битумной пленки:
— обычный битум; ---- модифицированный битум

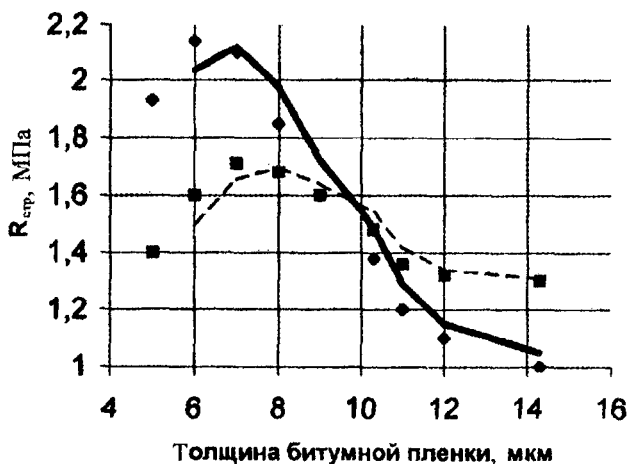


Рис. 5.13. Зависимость предельной структурной прочности от толщины битумной пленки:
— обычный битум; ---- модифицированный битум

1. *Асфальтобетон и органоминеральные смеси на наполнителях гидравлического действия.* Их получают путем замены минерального порошка и части песка гидравлическим вяжущим. Смеси готовят, как обычный асфальтобетон, но в процессе смешения или на стадии укладки подают воду с целью активизации процессов гидратации. В качестве гидравлического вяжущего используют цемент, цементную пыль, сланцевую золу. Достаточно эффективны комбинированные наполнители, состоящие из смеси гипсосодержащих отходов и сланцевой золы или цемента.

Готовят бетоны этого вида по трем технологиям: 1) горячей; 2) теплой; 3) холодной.

Горячая технология предполагает нагрев каменного материала и органического вяжущего до рабочей температуры, смешение, распределение смеси в дорожном полотне, ввод воды и уплотнение. Воду целесообразно подавать в шнекораспределительное отделение асфальтоукладчика при температуре 60...80°C в количестве 3...5 мас.%. Горячая технология применяется в случае использования органических вяжущих повышенной вязкости и высокомарочных гидравлических вяжущих (цемента), поскольку ввод воды на стадии смешения приводит к «запариванию» цемента, его мгновенному схватыванию и потере технологических качеств смеси.

Теплая технология применяется при использовании маловязких органических вяжущих и малоактивных наполнителей (сланцевая зола). Каменные материалы нагревают до 60...120°C, затем вводят органическое вяжущее, нагретое до рабочей температуры, наполнитель и воду. Малая активность наполнителя исключает «запаривание», а низкая вязкость органического вяжущего позволяет осуществить перемешивание в присутствии воды. Особенно эффективна теплая технология для приготовления дегтезоломинеральных композитов.

При холодной технологии минеральный материал естественной температуры увлажняют до 8...10 %, затем вводят гидравлический наполнитель и нагретое до рабочей температуры органическое вяжущее. Применение этой технологии эффективно для комбинированных наполнителей на основе влажных отходов производства (цитрогипса и сланцевой золы). Классическим видом холодной технологии является применение битумных эмульсий.

К бетонам первого вида относят также асфальтобетонные смеси на основе доменных шлаков и холодные дегтешлаковые смеси. Под

действием воды на контактах шлаковых частиц образуются кристаллизационные связи.

Бетоны первого вида обладают технологической простотой, позволяют повышать прочность материала в 2...5 раз, однако не используют полностью потенциал гидравлического наполнителя ввиду наличия гидрофобных пленок, препятствующих проникновению воды и гидратации, особенно в случае горячей технологии. Основной особенностью композитов отмеченной группы является то, что взаимодействие, а следовательно, и эффект от применения различных вяжущих, проявляется на уровне микроструктуры.

2. *Материалы, получаемые способом отдельного смешения.* В этом случае асфальтовую и цементную составляющую готовят отдельно, затем объединяют. К данному виду относят асфальтобетоны с добавками цементного теста и цементного молока. Цементное тесто подают в смеситель либо перемешивают с холодной асфальтобетонной смесью.

Более широкое распространение нашли бетоны данной группы, получаемые способом отдельного бетонирования, когда по слою уплотненного черного щебня распределяют цементопесчаный раствор (метод «бетохальт») или специальный цементоплимерный состав (метод «солювиации»), а затем с помощью виброуплотнения заполняют ими пустоты черного щебня. К бетонам, получаемым способом отдельного смешения, можно отнести цементобетоны с добавками черного щебня, обработанные цементным раствором частицы регенерированного асфальтобетона, а также гранулированные грунты.

Бетоны второго вида позволяют практически полностью использовать потенциал цемента и по прочности занимают промежуточное место между асфальто- и цементобетоном, однако их изготовление связано с определенными технологическими сложностями на стадии приготовления и укладки. При приготовлении необходимо наличие двух смесительных агрегатов, особых дозирующих устройств; при вводе цементного теста не исключена возможность «запаривания» смеси. Для укладки требуются специальные распределители и мощная виброуплотняющая техника. С точки зрения структуры бетоны второго вида – перколированные системы; их свойства определяются, прежде всего, характером расположения и количеством материалов различной природы. Влияние минерального вяжущего у бетонов второй группы может проявляться на уровне

микро- и мезоструктуры (асфальтобетоны с добавкой цементного теста, гранулированные грунты) либо на уровне мезо- и макро-структуры (дробленный асфальтобетон, обработанный цементным тестом или раствором, смеси типа «бетохальт»).

3. *Блочные бетоны, получаемые путем объединения в одно целое по технологии крупных агрегатов асфальто- и цементбетона.* Бетоны данного вида позволяют получить высокую продольную жесткость при практически полном сохранении высокой релаксационной способности покрытия. Влияние минерального вяжущего проявляется на уровне макроструктуры.

Хотя приведенная классификация достаточно условна, она все же позволяет объединить и сгруппировать по наиболее важным признакам всю огромную гамму бетонов на ОГВ.

Классификация бетонов на ОГВ свидетельствует, что минеральное вяжущее в зависимости от технологии приготовления участвует в структурообразовании на уровне микро-, мезо- или макроструктуры.

Значения коэффициентов запаса и уровней надежности бетонов на ОГВ, полученных по горячей технологии (1-й группы), представлены в табл. 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1

Показатели свойств бетонов на ОГВ

Номер состава	Вязкость битума, °П	Количество битума, %	Количество цемента, %	Прочность при 50 °С, МПа	Прочность при 0 °С, МПа	R _c , МПа
1	50	4	10	0,6	1,6	2,4
2		4	15	1,0	2,2	2,5
3		6	10	0,9	2,46	8,5
4		6	15	1,9	3,1	10,0
5	110	4	10	0,65	0,92	3,4
6		4	15	0,96	1,56	6,0
7		6	10	0,55	1,7	8,5
8		6	15	0,94	2,0	10,0
9	250	4	10	0,87	1,2	4,0
10		4	15	1,34	2,2	4,5
11		6	10	0,9	1,5	8,0
12		6	15	0,85	2,1	7,5

Примечание. Значения прочности на растяжение даны по бразильскому методу.

Значения коэффициентов запаса и уровней надежности

Номер состава по табл. 8.5	Значение коэффициента запаса				Значение уровня надежности				Общий уровень надежности
	K_1 по (8.8)	K_2 по (8.34)	K_3 по (8.35)	K_4 по (8.41)	P_1	P_2	P_3	P_4	
1	1,0	0,45	1,0	2,2	0,5	0,43	0,5	0,98	0,32
2	1,73	0,34	1,04	2,36	0,97	0,3	0,52	0,98	0,39
3	1,5	1,04	3,4	1,26	0,98	0,51	0,99	0,9	0,67
4	3,1	0,96	4,0	1,31	0,99	0,47	0,99	0,92	0,42
5	1,08	1,1	1,36	1,18	0,52	0,52	0,93	0,8	0,2
6	1,6	1,08	2,4	1,2	0,97	0,52	0,98	0,8	0,4
7	0,9	1,47	3,4	1,03	0,47	0,97	0,99	0,51	0,48
8	1,6	1,5	4,0	1,03	0,98	0,98	0,99	0,51	0,7
9	1,45	1,01	1,6	1,28	0,97	0,5	0,98	0,9	0,43
10	2,23	0,64	1,8	1,77	0,99	0,2	0,98	0,98	0,44
11	0,9	1,58	3,2	1,0	0,45	0,97	0,99	0,5	0,46
12	1,41	1,06	3,0	1,23	0,98	0,51	0,99	0,86	0,65

Таким образом, можно рекомендовать следующие составы: состав № 3 (содержание цемента – 10 %, содержание битума с пенетрацией 50 – 6 %); состав № 8 (содержание цемента – 15 %, битума с пенетрацией 110 – 6 %); состав № 12 (содержание цемента – 15 %, битума марки 250 – 6 %).

Наименьший запас надежности имеет состав № 5 (содержание цемента – 10 %, битума с пенетрацией 110 – 4 %).

Асфальтобетоны на битумах повышенной вязкости и твердых битумах. Как было отмечено в итоговых документах конгресса [33], одним из перспективных направлений повышения надежности и долговечности асфальтобетона является применение твердых и многослойных (multigrade) битумов.

К твердым относят битумы с пенетрацией 10...40 градусов. В отличие от вязких твердые битумы имеют повышенную адгезию и когезию, тепло- и водостойкость. Недостатком является повышенная хрупкость. С целью максимального использования положительных свойств твердых битумов и ликвидации отрицательных используется специальная прерывистая гранулометрия с минимальным содержанием фракции мельче 0,14 мм. Расход битума повышен по сравнению с оптимальным на 15...25%.

Многослойные битумы по своим свойствам занимают промежуточное положение между обычными и модифицированными полимерами – битумами. Их получают по специальной патентованной технологии на заводах фирмы «Шелл». Установлено, что асфальтобетоны на таких битумах также обладают повышенной надежностью и долговечностью.

Исследований по применению твердых и многослойных битумов в условиях РБ практически не проводились. В этом плане более перспективно говорить о применении битумов повышенной вязкости в структуре щебеночно-мастичных асфальтобетонов.

Щебеночно-мастичные асфальтобетоны содержат в своем составе до 80 % дробленных частиц фракции более 2 мм. Пустоты заполняются битумом повышенной вязкости. Для обеспечения требуемых технологических свойств дополнительно вводятся структурирующие добавки (волокна, природные асфальты и т.д.).

С увеличением вязкости битума (температуры размягчения) растет надежность асфальтобетона по устойчивости к пластическим деформациям. В целом за счет увеличения вязкости можно решить проблемы пластических деформаций и обеспечить надежность покрытий в пределах 90...95%.

Однако увеличение вязкости битума отрицательно сказывается на трещиностойкости, а в некоторой степени – и на коррозионной стойкости.

Однако здесь следует обратить внимание на один важный момент: с ростом толщины битумной пленки растет и устойчивость по данным показателям. При температуре размягчения 60...70°C толщина битумной пленки, для которой Р2 и Р4 находятся в пределах 0,9, составляет 8...10 мкм.

Таким образом, при применении битумов повышенной вязкости гранулометрия асфальтобетона должна быть такой, чтобы обеспечить толщину пленки битума около 8...10 мкм.

Бесспорно, что для широкого применения подобных асфальтобетонов, как и асфальтобетонов на модифицированных битумах, прежде всего, необходимо решить проблему получения качественных минеральных материалов (щебня, искусственного песка). В противном случае, как уже отмечалось выше, эффект может быть утерян.

5.2. Конструктивные пути повышения надежности дорожных покрытий

Конструктивными мерами можно добиться повышения надежности материала покрытия за счет:

1) устройства тонких защитных слоев, оберегающих материал покрытия от непосредственного воздействия транспортной нагрузки и погоднo-климатических факторов;

2) предотвращения быстрого появления на покрытии дефектов нижнего слоя или основания.

Как было показано выше, получить надежный и долговечный асфальтобетон по всем параметрам применительно к климату РБ – очень сложная задача. Высокой устойчивостью к пластическим и хрупким деформациям обладают многощербенистые асфальтобетоны повышенной жесткости. Однако они имеют низкую коррозионную стойкость, что сводит на нет их преимущества. Поэтому пришлось время решать проблему надежности и долговечности асфальтобетона не материаловедческими, а конструкторско-организационными методами.

Одним из таких путей является применение многощербенистых жестких смесей с защитой их от коррозии тонкими водостойкими слоями износа. Состав защитного слоя должен быть водонепроницаемым и достаточно шероховатым. При этом допускается снижение прочности при высоких температурах ввиду малой толщины слоя. В качестве защитного слоя могут использоваться тонкослойные асфальтобетонные покрытия и поверхностные обработки.

К тонкослойным покрытиям автомобильных дорог относят слои покрытия толщиной 2...3 см, устраиваемые из горячего асфальтобетона по традиционной технологии. Основное отличие смесей для тонкослойных покрытий от традиционных заключается в повышенном содержании щебня, вязкого битума и специальных (в основном, волокнистых и полимерных) добавок.

Наиболее предпочтительными асфальтобетонами для устройства тонкого защитного слоя в условиях РБ являются материалы Fibracotm, Acoduit (Франция).

Тонкие асфальтобетонные слои из материала Fibracotm имеют толщину 2...3 см, величину фракций минерального материала 0...10 мм, пенетрацию применяемого битума 60/70. В состав смеси

вводят специальные тонкодисперсные наполнители (фибры), а в состав битума – полимеры типа термоэластопластов (кратон).

Минеральная часть включает: песок фракции 0/2 мм, 0/4 мм, щебень фракции 2/6,3 мм, 4/6,3 мм, 6,3/10 мм, минеральный порошок.

Тонкомолотые волокнистые наполнители имеют длину до 1 мм, диаметр 45 мк, удельную поверхность – более 6000 см²/гр.

Состав асфальтобетонной смеси (пределы содержания компонентов):

Размер сит, мм	% прохода через сито
10	89...100
6	44...63
4	28...40
2	18...28
0,08	8...12
Битум 50/70	6,3...7%
Органические волокна	0,3...0,4%

К разновидности тонкослойных покрытий можно отнести также технологию «Новачип» [34]. Асфальтобетонные покрытия, выполненные по этой технологии, представляют собой тонкослойные покрытия из горячих асфальтобетонных смесей толщиной 10...15 мм, укладываемых на слои проклеивания и герметизации из катионной модифицированной эмульсии, наносимой непосредственно перед укладкой асфальтобетонной смеси.

Структура покрытия по типу «Новачип» представлена на рис. 5.14.

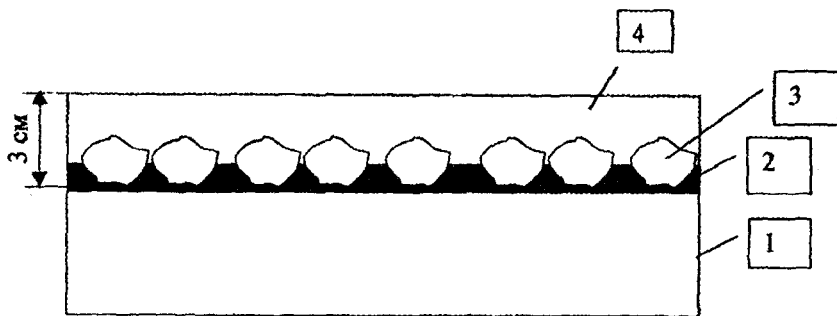


Рис. 5.14. Структура покрытия по типу «Новачип»:

1 – нижний слой покрытия; 2 – битумополимерная эмульсия;
3 – горячий черный щебень; 4 – щебеночно-мастичный асфальтобетон

На вновь устраиваемых покрытиях возможно копирование дефектов нижних слоев и оснований (*отраженные дефекты*). Это относится, в основном, к температурным отраженным трещинам.

Отраженные трещины (ОТ) – продольные и поперечные трещины в дорожном покрытии, возникающие в местах наличия трещин в нижних слоях или основании. ОТ возникают при устройстве асфальтобетонного покрытия на цементобетонном основании, имеющем деформационные швы, а также при укладке новых слоев асфальтобетона на старое покрытие с наличием трещин (средний и капитальный ремонты). Причиной появления ОТ является концентрация напряжений в районе трещины, возникающих от температурных деформаций при охлаждении слоя.

В общем случае вероятность появления отраженных трещин определяется следующими факторами:

$$P = f\left(\frac{L, \Delta T, E_a, E_o, h_o, C}{h_a, N}\right), \quad (5.1)$$

где L – расстояние между трещинами;

ΔT – перепад температуры в слое с трещинами в расчетный период;

E_a, E_o – модули релаксации нового слоя покрытия и слоя с трещинами;

h_a, h_o – толщина нового слоя и слоя с трещинами;

C – прочность сцепления нового покрытия и слоя с трещинами;

N – параметр, учитывающий ширину раскрытия трещины и ее форму.

Чем выше значения параметров числителя формулы (5.1), тем выше вероятность появления отраженных трещин, и наоборот, чем больше знаменатель, тем меньше вероятность появления трещин.

Анализ формулы (5.1) позволяет наметить основные пути борьбы с отраженными трещинами: увеличение толщины покрытия, устройство трещинопрерывающих слоев и трещинопрерывающих мембран, разделение слоев с наличием трещин на отдельные фрагменты (размером до 1 м), снижение толщины слоя с трещинами (путем фрезерования).

Трещинопрерывающий слой – это слой из зернистого каменного материала специального состава (смесь различных фракций щебня), обработанный небольшим количеством битума (до 3%), укладываемый между покрытием с наличием трещин и новым покрытием с целью предотвращения появления отраженных трещин. Благодаря зернистости и низкой прочности на растяжение вследствие появления и ветвления трещин подобный слой активно гасит концентрации напряжений в районе трещин. Толщина слоя – 4...15 см.

Трещинопрерывающая мембрана – тонкий слой щебеночно-битумных смесей (до 3 см), укладываемый между покрытием с наличием трещин и новым покрытием с целью предотвращения появления отраженных трещин.

Трещинопрерывающая мембрана должна иметь высокие деформационные характеристики, благодаря которым напряжения в мембране интенсивно релаксируют и не передаются на новое покрытие. Существует несколько методов устройства мембран. Наиболее распространен метод устройства тонких слоев из смеси щебня и специального битумополимерного вяжущего.

Уменьшить вероятность появления отраженных трещин можно также путем изменения параметра N за счет увеличения ширины раскрытия трещины и изменения ее формы (разделка по треугольнику и т.д.).

6. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторная работа № 1

ОЦЕНКА УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ПО УПРУГОМУ ПРОГИБУ

Цель работы – освоение методики оценки частного уровня надежности дорожной одежды по какому-либо критерию прочности численными методами.

Теоретический материал по данному вопросу изложен в разд. 1.

Исходные данные: категория дороги, тип дорожной одежды, интенсивность движения автомобилей группы А, данные измерения модуля упругости.

Последовательность выполнения работы:

1. Руководитель задает массив данных измерений модуля упругости дорожной одежды на участке длиной 2...3 км (не менее 20 значений).

2. Массив подвергают статистической обработке и составляют сводку.

3. Строят зависимость частоты от значения модуля (графическую кривую распределения).

4. В зависимости от категории дороги и условий движения определяют значение требуемого модуля упругости.

5. Графическим или аналитическим способом вычисляют уровень надежности и осуществляют прогноз срока службы.

Пример. Категория дороги – III. Тип покрытия – усовершенствованное капитальное. Интенсивность движения автомобилей группы А – 15 авт./сут. на одну полосу движения.

В результате проведенных замеров получены следующие значения модуля упругости: 121; 143; 155; 187; 122; 131; 157; 188; 122; 133; 157; 193; 125; 132; 156; 197; 141; 133; 170; 206; 141; 154; 175; 210; 142; 154; 176; 158; 142; 155; 177; 158; 143; 156; 84; 161; 162; 128; 148; 117; 172; 143; 164; 144; 152; 133; 106; 139; 165; 145; 152; 134; 194; 178; 165; 145; 90; 133; 114; 125; 165; 145; 102; 135; 135; 165; 169; 146; 106; 135; 176; 193; 172; 147; 111; 136; 96; 143; 173; 146; 112; 182; 171; 141; 127; 147; 116; 137; 111; 166 МПа.

Определяем требуемое значение модуля упругости по формуле (1.2):

$$E_{mp} = a + b \lg N_p = 65 + 65 \lg 15 = 140 \text{ МПа.}$$

Полученные данные измерения модуля упругости подвергаем статистическому анализу в следующей последовательности.

1. Находим максимальное и минимальное значение модуля:

$$E_{\max} = 210 \text{ МПа;}$$

$$E_{\min} = 90 \text{ МПа.}$$

2. Задаем число разрядов (10...20). Принимаем $m = 10$.

3. Определяем интервал разряда:

$$DE = (E_{\max} - E_{\min})/m = (210 - 90)/10 = 12.$$

4. Составляем сводку (табл. 6.1).

Таблица 6.1

№ разряда	Значение разряда	Среднее значение разряда	Частота, шт.	Частость
1	90...100	95	2	0,022
2	101...110	105	3	0,033
3	111...120	115	6	0,067
4	121...130	125	7	0,078
5	131...140	135	12	0,133
6	141...150	145	18	0,200
7	151...160	155	12	0,133
8	161...170	165	9	0,10
9	171...180	175	10	0,11
10	181...190	185	5	0,056
11	191...200	195	4	0,044
12	201...210	205	2	0,022
			$\Sigma = N = 90$	$\Sigma = 0,1$

(Здесь частота – количество попаданий значений экспериментальных данных в указанный разряд. Частость – отношение частоты к общему числу замеров.)

5. Строим кривую распределения (зависимость частоты от среднего значения разряда) и вычисляем площадь между требуемым уровнем модуля и его максимальным значением (рис. 6.1).

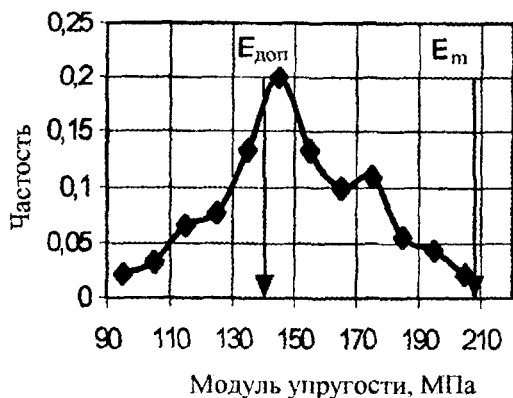


Рис. 6.1. Кривая распределения модуля упругости

Данная площадь принимается за уровень надежности. В нашем случае она составляет 0,63 (63%).

6. По формуле (2.4) определяем срок службы до капитального ремонта:

$$T = T_n \left(P_{тр} / P_n \right)^M = 15 (0,63/0,9)^{1,3} = 9,5 \text{ лет.}$$

Заключение. Расчетный срок службы дорожной одежды – ниже проектного. Капитальный ремонт необходимо произвести через 9 лет.

Лабораторная работа № 2

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Цель работы – освоение методики определения допустимых параметров расчетной величины.

Теоретический материал по данному вопросу изложен в 1.2.

Последовательность выполнения работы:

1. Руководитель задает массивы измерений расчетного параметра на участках с удовлетворительным и неудовлетворительным состоянием.

2. Массивы подвергают статистической обработке и строят кривые распределения (для их построения в данной работе можно использовать ЭВМ).

3. В качестве допустимой величины принимают точку пересечения кривых.

Пример. Необходимо установить допустимое значение прочности асфальтобетона на участках торможения (остановки, перекрестки).

Отобрали участки остановок и перекрестков с близкими условиями движения. Разбили их на две группы:

- 1) участки с наличием недопустимых пластических деформаций;
- 2) участки с отсутствием деформаций.

На каждом участке отобрали пробы асфальтобетона и в лаборатории оценивали прочность на сжатие при температуре +50 градусов.

Получили следующие значения прочности:

- 1) участки с наличием деформаций:

0,2; 0,82; 1,1; 1,21; 1,42; 1,75; 0,45; 0,85; 1,13; 1,22; 1,45; 1,85; 0,5; 0,87; 1,15; 1,25; 1,46; 1,9; 0,63; 0,9; 1,15; 1,3; 1,5; 2,2; 0,7; 0,94; 1,16; 1,33; 1,55; 2,2; 0,75; 1,05; 1,17; 1,35; 1,62; 0,87; 1,1; 1,19; 1,36; 1,7 МПа;

2) участки с отсутствием деформаций:

1,0; 1,67; 1,87; 2,09; 2,25; 1,25; 1,7; 1,88; 2,1; 2,3; 1,3; 1,72; 1,9; 2,12; 2,45; 1,42; 1,74; 1,94; 2,12; 2,5; 1,5; 1,81; 1,95; 2,14; 2,55; 1,55; 1,82; 1,96; 2,15; 2,65; 1,64; 1,84; 2,05; 2,22; 2,7; 1,65; 1,85; 2,06; 2,24; 3,0 МПа.

Показатели прочности подвергли статистической обработке на ЭВМ по программе «Statgrafics». В результате получены следующие кривые распределения (рис. 6.2).



Рис. 6.2. Кривые распределения прочности асфальтобетона:
1 — участки с отсутствием деформаций; 2 — участки с наличием деформаций

Допустимое значение составляет 1,6 МПа.

Расчетное значение определим по формуле (1.20), приняв коэффициент вариации равным 0,2 и коэффициент нормированного отклонения равным 1,3:

$$E_{mp} = E_{дон}(1 + tK_{\sigma}) = 1,6(1 + 1,3 \cdot 0,2) = 2,0 \text{ МПа.}$$

Заключение. Для обеспечения деформационной устойчивости прочность асфальтобетона на участках торможения должна составлять 2,0 МПа.

ОЦЕНКА ПРОЕКТНОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ

Цель работы – освоить методику оценки проектного и технологического уровня надежности.

Теоретический материал по данному вопросу изложен в 2.1, 2.2.

Работа выполняется в два этапа.

1. Оценка проектного уровня надежности.

Оценка проектного уровня надежности производится расчетным путем.

Исходные данные: конструкция дорожной одежды, интенсивность движения расчетных автомобилей, расчетные характеристики грунта и материалов слоев дорожной одежды.

Последовательность выполнения работы:

1. Вычисляют требуемый модуль упругости дорожной одежды по формуле (1.2).

2. Расчет с использованием номограмм (рис. 3.3 [1]) находят фактический модуль упругости дорожной одежды. При этом значения расчетных характеристик материалов слоев дорожной одежды принимают для температуры $+10^{\circ}\text{C}$.

3. Вычисляют коэффициент запаса по формуле (2.1) и по рис. 1.6 находят частный уровень надежности по упругому прогибу.

4. Используя номограмму (рис. 3.11 [1]), вычисляют величину растягивающего напряжения в слое покрытия. При этом значения расчетных характеристик материалов слоев дорожной одежды принимают для температуры 0°C .

5. По формуле (2.2) вычисляют коэффициент запаса и по рис. 1.7 находят уровень надежности.

6. Используя номограмму (рис. 3.5 [1]), вычисляют величину касательного напряжения в грунте земляного полотна. При этом значения расчетных характеристик материалов слоев дорожной одежды принимают для температуры 20°C .

7. По формуле (2.3) вычисляют коэффициент запаса и по рис. 1.7 находят уровень надежности.

8. Определяют общий уровень надежности по формуле (1.27).

Пример. Принята дорога III категории. Интенсивность движения расчетных автомобилей составляет 100 авт./сут. Проектом предусмотрена следующая конструкция дорожной одежды.

1	1 – асфальтобетон мелкозернистый, горячий, плотный, на битуме 60/90, толщиной 4 см; 2 – асфальтобетон крупнозернистый, горячий, пористый, на битуме 60/90, толщиной 6 см; 3 – щебень, устраиваемый по методу заклинки, толщиной 18 см; 4 – грунт земляного полотна – песок мелкозернистый
2	
3	
4	

Рис. 6.3. Конструкция дорожной одежды

Расчетные характеристики приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Расчетные характеристики материалов дорожной одежды

№ слоя	Наименование материала	Модуль упругости при температуре °С, МПа			Предел прочности на изгиб, МПа	Угол внутреннего трения, градус	Коэффициент удельного сцепления, МПа
		0	10	20			
1	Асфальтобетон горячий, плотный	4500	3200	2400	2,8	-	-
2	Асфальтобетон горячий, пористый	2800	2000	1800	1,6	-	-
3	Щебень по методу заклинки	350	350	350	-	45	0,007
4	Грунт – песок мелкозернистый	100	100	100	-	38	0,005

1. Определяем коэффициент запаса и уровень надежности по упругому прогибу.

Определяем требуемый модуль упругости по формуле (1.2):

$$E_{тp} = a + b \lg N_p = 65 + 65 \lg 100 = 195 \text{ МПа.}$$

Расчетом (снизу вверх) на основе номограммы (рис. 3.3 [1]) находим эквивалентный фактический модуль упругости запроектированной дорожной одежды. Расчетная температура – 10°C.

В результате расчетов определяем, что эквивалентный модуль на поверхности покрытия равен 192 МПа.

Таким образом, $E_{\phi} = 192$ МПа.

Определяем коэффициент запаса по первому критерию прочности:

$$K_E = E_{\phi} / E_{mp} = 192 / 195 = 0,98.$$

По рис. 1.6 находим уровень надежности, который составил 0,95.

2. Определяем коэффициент запаса и уровень надежности по критерию трещиностойкости монолитных слоев.

Расчетную температуру принимаем 0°C.

По номограмме (рис. 3.11 [1]) находим величину напряжения от действия транспортной нагрузки, которое составит:

$$\sigma = \bar{\sigma} \cdot P = 3,5 \cdot 0,6 = 2,1 \text{ МПа},$$

где $\bar{\sigma}$ – напряжение, полученное по номограмме;

P – удельное давление от расчетного автомобиля.

Вычисляем коэффициент запаса по формуле (2.2):

$$K_R = R_{и} / \sigma_P = 2,8 / 2,1 = 1,33.$$

Находим уровень надежности по рис. 1.7, который составит 0,97.

3. Определяем коэффициент запаса и уровень надежности по сдвигоустойчивости грунта земляного полотна. Расчетная температура +20°C.

Вычисляем средний модуль упругости слоев дорожной одежды:

$$E_{cp} = (2400 \cdot 4 + 1800 \cdot 6 + 350 \cdot 18) / (4 + 6 + 18) = 953 \text{ МПа}.$$

По номограмме (рис. 3.5 [1]) находим:

$$\tau_{ам} = 0,026 \cdot 0,6 = 0,016 \text{ Па}.$$

По номограмме (рис. 3.6 [1]) находим:

$$\tau_{ав} = - 0,002 \text{ МПа.}$$

Определяем коэффициент запаса по (2.3):

$$K_c = K \cdot c / \tau_a + \tau_\partial = 3,7 \cdot 0,006 / (0,016 - 0,002) = 1,57.$$

Определяем уровень надежности по рис. 1.7, значение которого составит 0,99.

Определяем общий проектный уровень надежности:

$$P_{об} = \sqrt[3]{0,95 \cdot 0,97 \cdot 0,99} = 0,97.$$

2. Оценка строительного уровня надежности.

Последовательность выполнения работы:

1. Из отобранных проб материала покрытия готовят 12 образцов цилиндров.

2. Определяют прочность на растяжение по бразильскому методу при температурах +10,0 и -15 градусов (значения прочности задает руководитель).

3. По методике, изложенной в 2.2, определяют расчетные характеристики.

4. По формуле (1.21) определяют коэффициент запаса и вычисляют уровень надежности.

Пример. В результате испытания образцов материала покрытия получены следующие значения прочности:

прочность при 0°C – 2,4 МПа;

прочность при +10°C – 1,7 МПа;

прочность при -15°C и скорости деформации 3 мм/мин – 3,1 МПа;

прочность при -15°C и скорости деформации 10 мм/мин – 3,4 МПа.

Вычисляем значение предельной структурной прочности по формуле (2.6):

$$R_c = \frac{\bar{R}}{1 + 1,92 \lg\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} = \frac{3,25}{1 + 1,92 \cdot (-0,04)} = 3,53 \text{ МПа.}$$

По формуле (2.8) вычисляем значение прочности на изгиб в расчетных условиях соответственно при 0 и +10°C:

$$R_u(10) = \frac{2,5R}{0,431 + R/R_c} = \frac{2,5 \cdot 1,7}{0,431 + 1,7/3,53} = 4,6 \text{ МПа};$$

$$R_u(0) = \frac{2,5R}{0,431 + R/R_c} = \frac{2,5 \cdot 2,4}{0,431 + 2,4/3,53} = 5,4 \text{ МПа}.$$

По (2.9) находим значение максимального модуля упругости:

$$E_c = 3,6(16,3R_c)^{1,9} = 7950 \text{ МПа}.$$

По (2.10) находим значения модуля упругости при температурах 0 и +10°C соответственно:

$$\lg(E/E_c) = \frac{\lg(R/R_c)}{m}.$$

Для 0°C получим:

$$\lg(E/E_c) = \frac{\lg(R/R_c)}{m} = \frac{\lg(2,4/3,53)}{0,8} = -0,17;$$

$$E/E_c = 0,68;$$

$$E = 5406 \text{ МПа}.$$

Соответственно при +10°C получим

$$E = 3238 \text{ МПа}.$$

Определяем коэффициент запаса.

По модулю

$$K_z = E_\phi / E_{np}, \quad (6.1)$$

где E_ϕ – полученный выше модуль при +10°C;

E_{np} – проектный модуль.

В нашем случае

$$K_3 = 3238/3200 = 1,01.$$

По прочности

$$K'_3 = R_\phi / R_{np}, \quad (6.2)$$

где R_ϕ – фактическая прочность на изгиб;

R_{np} – проектная прочность.

В нашем случае

$$K_3 = 5,4/2,8 = 1,93.$$

По рис. 1.6 и 1.7 найдем уровни надежности, которые составят: по модулю 0,95, по прочности 0,99.

Определяем общий строительный уровень надежности:

$$p_0 = \sqrt{0,95 \cdot 0,99} = 0,97.$$

Заключение. Технологический уровень надежности равен проектному. Следовательно, корректировка конструкции дорожной одежды или межремонтных сроков не требуется.

Лабораторная работа № 4

ОЦЕНКА УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

Цель работы – освоение методики определения уровня повреждаемости материала покрытия с прогнозом срока службы или расчетом слоя усиления.

Теоретический материал по данному вопросу изложен в 2.3.

Исходные данные: категория дороги, интенсивность движения расчетных автомобилей, срок эксплуатации и срок проведения первого среднего ремонта, толщина слоев, обработанных битумом.

Порядок выполнения работы:

Используя методику, приведенную в 2.3, вычисляют уровни работоспособности и повреждаемости. Затем осуществляют прогноз срока службы или расчет слоя усиления.

Можно использовать упрощенную программу на ЭВМ «Utexр», имеющуюся в библиотеке кафедры «Проектирование дорог» БГПА.

Пример.

Исходные данные:

1. Категория дороги – II.
2. Толщина слоев, обработанных битумом, м, – 0,13.
3. Срок службы – 12 лет.
4. Срок проведения 1-го среднего ремонта – 5 лет.
5. Фактическая интенсивность автомобилей группы А на полосу – 140 авт./сут.
6. Показатель изменения интенсивности – 1.
7. Требуемый модуль упругости – 170 МПа.
8. Фактический модуль – 180 МПа.

В результате расчетов по программе «Utexр» получены следующие результаты:

уровень работоспособности – 0,673;

уровень повреждаемости – 0,268.

Найдем по формуле (2. 27) показатель дефектности структуры:

$$K = (\Psi_{np} - \Psi_{\phi}) / \Psi_{np} = (0,7 - 0,268) / 0,7 = 0,62.$$

По (2.28) найдем коэффициент запаса:

$$K_3 = \sum_{i=1}^n (K_i E_i) / n E_{mp} = 0,62 \cdot 180 / 170 = 0,66.$$

По рис. 1.6 находим уровень надежности, который составит 0,63.

Заключение. Дорожная одежда в настоящий момент нуждается в капитальном ремонте.

Лабораторная работа № 5

ОЦЕНКА ЧАСТНЫХ И ОБЩЕГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ МАТЕРИАЛА ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Цель работы – освоение методики оценки уровня надежности материала покрытия.

Теоретический материал по данному вопросу изложен в разд. 4.

Работа разбивается на 4 этапа.

1. Оценка частного уровня надежности из условия устойчивости к пластическим деформациям.

В лаборатории готовят 6 образцов асфальтобетона. Перед испытанием их выдерживают в течение 1 ч при заданной температуре (323 ± 1) К в воде. Половина образцов предназначена для испытания на одноосное сжатие (рис. 6.4 а), другая половина – по схеме Маршалла (рис. 6.4 б).

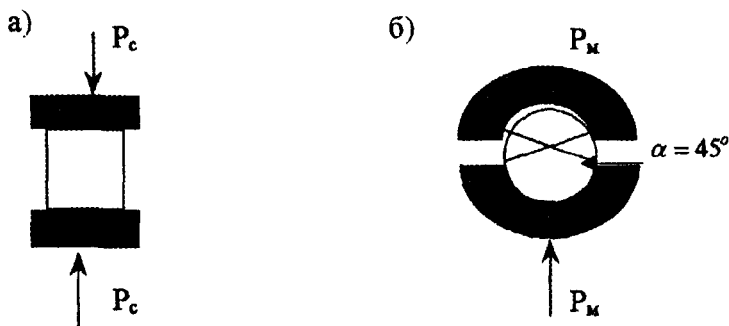


Рис. 6.4. Схемы испытаний образцов асфальтобетона

Максимальные разрушающие нагрузки и соответствующие предельные деформации образцов определяют при двух схемах нагружения: 1) при одноосном сжатии; 2) при сжатии по схеме Маршалла. Скорость деформирования образцов для обеих схем нагружения следует принимать одинаковой и равной ($50 \pm 0,5$) мм/мин.

Образец, извлеченный из водяной бани, устанавливают в центр нижней плиты пресса при первой схеме нагружения или в нижнюю часть обжимного устройства при второй схеме нагружения.

Верхняя плита пресса должна находиться на расстоянии 10...20 мм от верхнего обжимного устройства. Затем включают электродвигатель пресса и начинают нагружать образец. В процессе испытания фиксируют максимальное показание силоизмерителя, которое принимают за разрушающую нагрузку; одновременно записывают деформационную диаграмму, с помощью которой определяют предельную деформацию, соответствующую разрушающей нагрузке, а также фиксируют время нагружения образца по секундомеру. При отсутствии устройства для записи деформационных диаграмм допускается определять предель-

ную деформацию по произведению постоянной скорости деформирования и времени нагружения образца с точностью до третьего десятичного знака методом округления по условию:

$$l = 0,833 \cdot t, \text{ мм}, \quad (6.3)$$

где t – время нагружения, с;

0,833 – переводной коэффициент, равный величине деформации образца за одну секунду, получаемый путем деления скорости деформации (50 мм/мин) на 60 секунд.

Обработка результатов испытания. Для каждого образца, испытанного на одноосное сжатие и по схеме Маршалла, вычисляют работу, затраченную на разрушение, по формуле

$$A = \frac{Pl}{2}, \quad (6.4)$$

где A – работа, затраченная на деформирование образца до разрушения, Дж;

P – разрушающее усилие, кН;

l – предельная деформация, мм.

Среднюю работу деформирования образцов при одноосном сжатии и при сжатии по схеме Маршалла вычисляют с точностью до второго десятичного знака как среднеарифметическое результатов испытания трех образцов.

Тангенс угла внутреннего трения асфальтобетона ($\text{tg}\varphi$) вычисляют с точностью до третьего десятичного знака методом округления по формуле

$$\text{tg}\varphi = \frac{3(A_m - A_c)}{3A_m - 2A_c}, \quad (6.5)$$

где A_m , A_c – средняя работа деформирования образцов асфальтобетона при испытании соответственно по схеме Маршалла и при одноосном сжатии, Дж.

Силу внутреннего сцепления (C_n) вычисляют с точностью до третьего десятичного знака методом округления знака по формуле

$$C_n = \frac{1}{6} (3 - 2\operatorname{tg}\varphi) R_c, \quad (6.6)$$

где R_c – предел прочности при одноосном сжатии, МПа, определяемый по схеме 1 (см. рис. 6.4 а), рассчитанный по СТБ 1115-98, п. 6.9.4.

Пусть в результате проведенных экспериментов получены следующие значения: $C_n = 0,45$ МПа; $\operatorname{tg}\varphi = 0,9$.

По формуле (4.44) вычисляют коэффициент запаса по устойчивости к пластическим деформациям:

$$K_{пл} = \frac{CK}{(\sigma_p - m \cdot \operatorname{tg}\varphi \cdot \sigma_c)} = \frac{0,45 \cdot 0,7}{0,5 - 0,4 \cdot 0,9 \cdot 1} = 2,25.$$

По рис. 4.1 (кривая 1) найдем частный уровень надежности, который составит 0,96.

2. Оценка частного уровня надежности по условию температурной трещиностойкости.

Готовят 9 образцов-цилиндров асфальтобетона. Три образца испытывают на прочность при растяжении по образующей цилиндра при температуре 0°С и скорости деформации 3 мм/мин, остальные – при температуре -15°С и скоростях деформации 3 и 10 мм/мин. Перед испытанием образцы выдерживают в течение двух часов при температуре -15°С.

По формуле (4.53) находят значение предельной структурной прочности и по формуле (4.54) вычисляют коэффициент запаса.

Воспользуемся данными работы 3 (часть 2), где были получены следующие результаты эксперимента:

прочность при 0°С – 2,4 МПа;

предельная структурная прочность – 3,53 МПа.

Определим коэффициент запаса:

$$K_3 = 0,5 \cdot 3,53/2,4 = 0,74.$$

По рис. 4.1 (кривая 2) найдем уровень надежности, который составит 0,3.

3. Оценка частного уровня надежности по условию усталостной долговечности.

Оценку частного уровня надежности по 3-му критерию производят с помощью расчета, используя данные п. 2 настоящей работы и формулу (4.56). Значение требуемой прочности примем для дороги III категории, равной 2,5 МПа.

$$K_3 = R_c^{\phi} / R_c^{mp} = 3,53/2,5 = 1,41.$$

Частный уровень надежности найдем по рис. 4.1 (кривая 3). Его значение составит 0,99.

4. Оценка частного уровня надежности по условию коррозионной стойкости.

Образцы – цилиндры в количестве 6 штук – испытывают через 24 часа после изготовления. Перед испытанием на морозостойкость 3 образца насыщают 5 %-ным водным раствором поваренной соли по СТБ 1115-98, п. 6.7.3; 3 образца являются контрольными и хранятся при комнатной температуре.

Водонасыщенные образцы загружают в морозильную камеру так, чтобы расстояние между ними было не менее 50 мм. После загрузки камеры температура в ней повысится. Началом замораживания считают момент, когда в морозильной камере установится температура -18°C . Продолжительность одного замораживания при установившейся температуре в камере должна быть не менее 4 ч. Оттаивание образцов после их выгрузки из морозильной камеры проводят в течение 4 ч в ванне с 5 %-ным раствором поваренной соли при температуре $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$.

После установленного числа циклов замораживания-оттаивания (25) образцы, подвергавшиеся вакуумированию, выдерживают в течение 2 ч в воде при температуре $(50 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ и определяют предел прочности на сжатие при 50°C .

Коэффициент морозостойкости вычисляют с точностью до второго десятичного знака методом округления по формуле

$$K = \frac{R_{mpz}}{R}, \quad (6.7)$$

где R – среднеарифметическое значение предела прочности на сжатие контрольных образцов, определяемого по СТБ 1115-98, п. 6.9, при температуре $+50^{\circ}\text{C}$, МПа;

$R_{мрз}$ – среднеарифметическое значение предела прочности на сжатие образцов после установленного числа циклов замораживания-оттаивания (25), определяемого по СТБ 1115-98, п. 6.9, при температуре +50°C, МПа.

Коэффициент морозостойкости составил 0,83.

По формуле (4.58) находим коэффициент запаса:

$$K_k = K_{\phi} / K_{мр} = 0,83 / 0,8 = 1,04.$$

По рис. 4.1 находим частный уровень надежности (кривая 4), который составит 0,7.

Вычисляем общий уровень надежности по формуле (1.27).

В нашем случае:

$$P_0 = \sqrt[4]{P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_4} = \sqrt[4]{0,96 \cdot 0,3 \cdot 0,99 \cdot 0,7} = 0,67.$$

Заключение. Фактический уровень надежности – ниже проектного, что свидетельствует о сокращении срока капитального ремонта. Это обусловлено низкой устойчивостью материала к появлению температурных трещин и коррозии.

По формуле (2.4) уточним срок службы покрытия:

$$T = T_n (P_{мр} / P_n)^M = 15 (0,67 / 0,95) = 10 \text{ лет.}$$

Таким образом, капитальный ремонт покрытия необходимо выполнить через 10 лет.

Л и т е р а т у р а

1. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46-83. – М.: Транспорт, 1985. – 157 с.
2. Н о в и к Ф. С., А р с о в А. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение, 1980. – 304 с.
3. В е р е н ь к о В. А. Дорожные композитные материалы. Структура и механические свойства. – Мн.: Наука и техника, 1993. – 246 с.
4. Я р о м к о В. Н. Новая технология ремонта цементобетонных покрытий. – Мн.: НПО «Белавтдорпрогресс», 1999. – 76 с.

5. Васильев П. А., Яковлев Ю. М., Коганзон М. С. и др. Реконструкция автомобильных дорог. – М.: МАДИ, 1998. – 125 с.
6. Богуславский А. М., Богуславский Л. А. Основы реологии асфальтобетона. – М.: Высш. школа, 1972. – 199 с.
7. Прочность и долговечность асфальтобетона / Под ред. Б.И.Ладыгина и И.К.Яцевича. – Мн.: Наука и техника, 1972. – 288 с.
8. Шулъман З. П., Ковалев Я. Н., Зальцгендлер Э. А. Реофизика конгломератных материалов. – Мн.: Наука и техника, 1998. – 240 с.
9. Грушко И. М., Ильин А. Г., Рашевский С. Т. Прочность бетонов на растяжение. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1973. – 155 с.
10. Золотарев В. А. Долговечность дорожных асфальтобетонов. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1978. – 112 с.
11. Работнов Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел. – М.: Наука, 1977. – 383 с.
12. Ильюшин А. А., Победря Б. Е. Основы математической теории термовязкоупругости. – М.: Наука, 1970. – 280 с.
13. Вильямс М., Ландел Р., Ферри Дж. Температурная зависимость релаксационных процессов в аморфных полимерах и других стеклюющихся жидкостях // Проблемы современной физики. Физика полимеров. Т. 8. – 1956. – № 12. – С. 20-33.
14. Яцевич И. К., Малиновский В. В. Взаимосвязь вязкости и прочности песчаного асфальтобетона // Автомобильный транспорт и дороги. – 1978. – Вып. 5. – С. 127-132.
15. Иванов Н. Н., Телегин М. Я. К обоснованию показателей механических свойств асфальтовых систем // Исследование органических вяжущих материалов и физико-механических свойств асфальтовых систем. – М.: Дориздат, 1949. – С. 106-132.
16. Руденский А. В. Обеспечение эксплуатационной надежности дорожных асфальтобетонных покрытий. – М.: Транспорт, 1975. – 64 с.
17. Золотарев В. А., Мищенко Г. М., Космин А. В. Исследование процессов деформирования и разрушения асфальтобетона: Материалы V Всесоюзного научно-технического совещания по основным проблемам технического прогресса в дорожном строительстве. Сб. 4(1). – М., 1971. – С. 121-125.
18. Нарисава И. Прочность полимерных материалов. – М.: Химия, 1987. – 400 с.

19. Кауш Г. Разрушение полимеров. – М.: Мир, 1981. – 440 с.
20. Разрушение / Под ред. Г. Любовица. – Т. 7. – Ч. 2. – М.: Мир, 1976. – 469 с.
21. Yee A. E., Bankeri R. G., Ngai K. L., Rendell R. W. Strain and temperature accelerated relaxation in polycarbonate // J. Polymer Sci. – 1988. – Vol. 26, ¹ 12. – P. 2463-2483.
22. Аскадский А. А. Новые возможные типы ядер релаксации // Механика композитных материалов. – 1987. – № 3. – С. 403-409.
23. Аскадский А. А., Блюменфельд А. А., Гальперин Е. Г., Чистяков А. А. Интегралы от функций влияния, учитывающих изменения энтропии в процессе релаксации напряжений, и анализ с их помощью экспериментальных данных // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. Т. 30. – 1988. – № 4. – С. 886-894.
24. Веренько В. А., Шумчик В. К. Критерии и методика оценки сдвигоустойчивости дорожных композитных материалов / Деп. ЦБНТИ Минавтодора РСФСР 10.09.89. – № 178-ад // Указатель неопубликованных и ведомственных материалов. – 1989. – № 5. – С. 6.
25. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
26. Иванов Н. Н., Ефремов Л. Г. О работоспособности асфальтового бетона в дорожном покрытии // Труды МАДИ. – 1973. – Вып. 63. – С. 52-59.
27. Радовский Б. С., Щербаков А. М., Малеванский Г. В. Оценка влияния количества вяжущего вещества на выносливость битумоминерального слоя // Пути совершенствования исследований и строительства черных покрытий автомобильных дорог. – Алма-Ата, 1973. – С. 88-89.
28. Руденский А. В., Штромберг А. А. Оценка усталостной долговечности асфальтобетона // Автомобильные дороги. – 1993. – № 9. – С. 13-15.
29. Королев И. В. Пути экономии битума в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1985. – 149 с.
30. S.H.Carpenter and T. VanDam. Mix Designs: Initial Mix Designs on Modified and Unmodified Asphalt Cements. Shell Development Company, Houston, Tex., June 1985.
31. S.F.Brown and K.E.Cooper. A Fundamental Study of the Stress-Strain Characteristics of a Bituminous Material. Proc., Association of Asphalt Paving Technologies, Vol.49, 1980.

32. J.H.Collins and W.J.Mikols. Block Copolymer Modification of Asphalt for Surface Dressing Applications. Presented at 60th Meeting of the Association of Asphalt Pavement Technologists, Feb. 1985.

33. Emploi des liants bitumineux modifies, des bitumes speciaux et des bitumes avec additifs en techniques routieres. Seminare international, Rome, 17/19, Juin, 1988.

34.РД 0219.1.09-99. Дорожные технологии на основе катионных битумных эмульсий.

Содержание

Введение	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД	3
1.1. Критерии прочности дорожных одежд	3
1.2. Основные понятия о надежности дорожных одежд	15
1.3. Взаимосвязь коэффициента запаса прочности и уровня надежности	18
2. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД	22
2.1. Надежность дорожных одежд на стадии проекта	22
2.2. Технологическая (строительная) надежность дорожных одежд	24
2.3. Эксплуатационная надежность дорожных одежд	26
3. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД	34
3.1. Материаловедческие пути повышения надежности дорожной одежды	34
3.2. Конструкционные пути повышения надежности дорожных одежд	36
4. НАДЕЖНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ	42
4.1. Общие положения надежности материалов дорожных покрытий	42
4.2. Основы теории деформирования и разрушения композиционных строительных материалов	45
4.3. Методика оценки надежности материала покрытия по устойчивости к пластическим деформациям	63
4.4. Методика оценки уровня надежности материала покрытий по устойчивости к температурным трещинам	70
4.5. Методика оценки уровня надежности по устойчивости к усталостным трещинам	74
4.6. Методика оценки уровня надежности по коррозионной стойкости	77
5. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ	78
5.1. Материаловедческие пути повышения надежности дорожных покрытий	78
5.2. Конструктивные пути повышения надежности дорожных покрытий	96

6. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	99
Лабораторная работа № 1. ОЦЕНКА УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ПО УПРУГОМУ ПРОГИБУ.....	99
Лабораторная работа № 2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТНОЙ ВЕЛИЧИНЫ.....	102
Лабораторная работа № 3. ОЦЕНКА ПРОЕКТНОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ.....	104
Лабораторная работа № 4. ОЦЕНКА УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ.....	109
Лабораторная работа № 5. ОЦЕНКА ЧАСТНЫХ И ОБЩЕГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ МАТЕРИАЛА ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ.....	110
Литература.....	115

Учебное издание

ВЕРЕНЬКО Владимир Адольфович

**НАДЕЖНОСТЬ ДОРОЖНЫХ
ОДЕЖД**

Пособие

Редактор Т.А.Палилова. Корректор М.П.Антонова
Компьютерная верстка Н.А.Школьниковой

Подписано в печать 12.04.2002.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 5,5. Тираж 450. Заказ 556.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусская государственная политехническая академия.

Лицензия ЛВ №155 от 30.01.98. 220027, Минск, проспект Ф.Скорины, 65.