ОДМ
*(проект, первая редакция)*

**ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
РОСАВТОДОР

# МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОСНОВНЫМ АЛГОРИТМАМ РАСЧЁТА НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СЛОЯХ АСФАЛЬТОБЕТОНА НЕЖЁСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО**

**(Росавтодор)**

**МОСКВА 2026**

# Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Автономной некоммерческой организацией «Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса» (АНО «НИИ ТСК») совместно с Обществом с ограниченной ответственностью «АкадемДорСервис» (ООО «АДС»).

2 ВНЕСЕН Управлением научно-технических исследований и информационных технологий Федерального дорожного агентства.

3 ИЗДАН на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от _____ № _____.

4 ИМЕЕТ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР.

# Содержание

1 Область применения

2 Нормативные ссылки

3 Термины и определения

4 Сокращения и обозначения

5 Общие положения

6 Исходные данные для расчёта

7 Расчёт суммарного числа приложений расчётной нагрузки

8 Моделирование температурного режима асфальтобетонных слоёв

8.1 Общие положения

8.2 Определение температуры покрытия

8.3 Определение температуры по глубине

8.4 Определение динамического модуля упругости

9 Моделирование влажностного режима грунта земляного полотна

10 Расчёт напряжённо-деформированного состояния многослойной конструкции

10.1 Общие положения

10.2 Расчётная схема

10.3 Метод расчета

11 Расчёт накопления усталостных повреждений

11.1 Общие положения

11.2 Помесячная дискретизация

11.3 Допустимое число приложений нагрузки

11.4 Алгоритм расчёта накопления повреждений

12 Критерии оценки прочности и определение площади сетки трещин

12.1 Определение площади сетки трещин

12.2 Критерий отказа дорожной конструкции

12.3 Определение фактического срока службы

13 Калибровка расчётной модели по данным натурных наблюдений

13.1 Общие положения

13.2 Исходные данные для калибровки

13.3 Метод наименьших квадратов

Приложение А (справочное) Блок-схема алгоритма расчёта

Приложение Б (обязательное) Математическая постановка задачи и метод расчёта напряжённо-деформированного состояния многослойной конструкции

Приложение В (справочное) Примеры расчёта накопления усталостных повреждений

**ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ**

# Методические рекомендации по основным алгоритмам расчёта накопления усталостных повреждений в слоях асфальтобетона нежёстких дорожных одежд

## 1 Область применения

Настоящий ОДМ распространяется на проектирование новых, реконструируемых и капитально ремонтируемых нежёстких дорожных одежд капитального типа с асфальтобетонными слоями для автомобильных дорог общего пользования I—III категорий.

Методика предназначена для расчёта и прогнозирования накопления усталостных повреждений в асфальтобетонных слоях под действием многократных транспортных нагрузок с учётом температурно-влажностного режима эксплуатации. Результатом расчёта является оценка площади поверхности покрытия, покрытой сеткой усталостных трещин, на любой момент в течение расчётного срока службы дорожной одежды.

## 2 Нормативные ссылки

В настоящем отраслевом дорожном методическом документе использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 32960-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчётные схемы нагружения»

ГОСТ 32965-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Методы учёта интенсивности движения транспортного потока»

ГОСТ Р 71404-2024 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежёсткие дорожные одежды. Правила проектирования»

ГОСТ Р 71405-2024 «Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование дорожных одежд. Методика расчёта коэффициентов приведения

транспортных средств к расчётной осевой нагрузке»

ГОСТ Р 59120-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Общие требования»

ГОСТ Р 59918-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежёсткие дорожные одежды. Методики оценки прочности»

ГОСТ Р 58401.12-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения динамического модуля упругости с использованием установки динамического нагружения (SPT)»

ГОСТ Р 58861-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Капитальный ремонт и ремонт. Планирование межремонтных сроков»

ГОСТ Р 58401.21-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения динамического модуля упругости и числа текучести с использованием установки динамического нагружения (AMPT)»

ГОСТ Р 59280-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения усталостной долговечности при непрямом растяжении»

ОДМ 218.3.1.005-2021 «Проектирование нежёстких дорожных одежд. Методические рекомендации по расчёту параметров напряжённо-деформированного состояния многослойных конструкций при воздействии колёсных нагрузок»

ОДМ 218.4.039-2018 «Рекомендации по диагностике и оценке технического состояния автомобильных дорог»

Общие технические условия

Примечание – При пользовании настоящим отраслевым дорожным методическим документом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов (сводов правил и/или классификаторов) в информационной системе общего пользования - на официальном сайте национального органа Российской Федерации по стандартизации в сети Интернет или по ежегодно издаваемому информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячно издаваемого информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт (документ), на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать

действующую версию этого стандарта (документа) с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт (документ), на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта (документа) с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт (документ), на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт (документ) отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

## 3 Термины и определения

В настоящем отраслевом дорожном методическом документе применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **доля накопленных усталостных повреждений:** безразмерная величина, характеризующая степень исчерпания усталостного ресурса асфальтобетонных слоёв, определяемая как отношение фактического числа приложений нагрузки к допустимому числу приложений при заданном уровне деформирования

3.2 **сетка усталостных трещин:** система взаимосвязанных трещин на поверхности асфальтобетонного покрытия, образующих ячейки, характерные для усталостного разрушения слоёв, вызванного многократным изгибом под действием транспортных нагрузок.

3.3

**динамический модуль упругости:** Абсолютное значение, полученное делением максимального (полного) напряжения на максимальную (полную) упругую деформацию материала, подверженного синусоидальной нагрузке.

[ГОСТ Р 58401.12—2019, пункт 3.2]

3.4 **калибровка расчётной модели:** процедура подбора эмпирических коэффициентов расчётной модели, обеспечивающая наилучшее совпадение расчётных значений площади сетки усталостных трещин с данными натурных наблюдений на участках-аналогах.

3.5 **деформация растяжения на нижней границе пакета асфальтобетонных слоёв:** горизонтальная деформация растяжения, возникающая в нижней части асфальтобетонного пакета при изгибе конструкции под действием транспортной нагрузки, являющаяся основным механическим параметром, определяющим накопление усталостных повреждений

3.6 **модель работоспособности асфальтобетона:** эмпирическая или полуэмпирическая зависимость, связывающая допустимое число циклов нагружения до усталостного разрушения с параметрами напряжённо-деформированного состояния (относительной деформацией растяжения и динамическим модулем упругости) для конкретного типа асфальтобетона.

3.7 **участок-аналог:** Участок эксплуатируемой автомобильной дороги, для которого известны: конструкция дорожной одежды (материалы, толщины слоёв, модули упругости); фактическая интенсивность движения за весь период эксплуатации; фактическая площадь покрытия, покрытая сеткой усталостных трещин $S_{факт}$, %, по данным диагностики (в соответствии с ОДМ 218.4.039-2018).

## 4 Сокращения и обозначения

4.1 В настоящем отраслевом дорожном методическом документе применены следующие сокращения:

| Сокращение | Расшифровка |
|---|---|
| ГОСТ | государственный стандарт |
| ДКЗ | дорожно-климатическая зона |
| НДС | напряжённо-деформированное состояние |
| ОДМ | отраслевой дорожный методический документ |

| Сокращение | Расшифровка |
|---|---|
| ТС | транспортное средство |

4.2 В настоящем отраслевом дорожном методическом документе применены следующие обозначения:

| Обозначение | Описание | Единица измерения |
|---|---|---|
| $C_f$ | эмпирический коэффициент усталостной модели | — |
| D | доля накопленных усталостных повреждений | — |
| $E_j$ | динамический модуль упругости j-го слоя | МПа |
| $E_{грунт}$ | модуль упругости грунта земляного полотна | МПа |
| $E_{ниж\ i}$ | модуль упругости нижнего слоя асфальтобетона в i-м месяце | МПа |
| $h_j$ | толщина j-го слоя | м |
| $K_i$ | коэффициент внутригодовой неравномерности для i-го месяца | — |
| $K_1$, $K_2$, $K_3$ | эмпирические коэффициенты усталостной модели | — |
| $Nf_i$ | допустимое число приложений нагрузки в i-м месяце | ед |

| Обозначение | Описание | Единица измерения |
|---|---|---|
| $N(t)$ | приведённая интенсивность движения в t-м году | авт./сут |
| $S$ | площадь покрытия, покрытая сеткой усталостных трещин | % |
| $S_{пред}$ | предельное значение площади сетки усталостных трещин | % |
| $S_i$ | коэффициент приведения i-го типа ТС к расчётной нагрузке | — |
| $T_{сл}$ | расчётный срок службы дорожной одежды | лет |
| $t$ | порядковый номер года эксплуатации дорожной одежды ($t = 1, 2, ..., T_{сл}$) | |
| $T_п$ | температура асфальтобетонного покрытия | °C |
| $T_в$ | температура воздуха | °C |
| $W_р$ | относительная влажность грунта | — |
| $\varepsilon_i$ | относительная деформация растяжения на нижней границе пакета асфальтобетонных слоёв в i-м месяце | мкм/м ($\mu\varepsilon$) |
| $\nu_j$ | коэффициент Пуассона j-го слоя | — |

| Обозначение | Описание | Единица измерения |
|---|---|---|
| $\sigma$ | напряжение | МПа |
| $\sigma_r$ | радиальное напряжение | МПа |
| $\sigma_z$ | вертикальное напряжение | МПа |
| $\sigma_\theta$ | окружное напряжение | МПа |
| $\tau_{rz}$ | касательное напряжение | МПа |
| $\omega_r$ | приведенная частота | Гц |
| $\Sigma Np$ | суммарное число приложений расчётной нагрузки за срок службы | ед |
| $\Sigma Np_i$ | суммарное число приложений расчётной нагрузки за i-й месяц | ед |

## 5 Общие положения

5.1 Конструкции дорожных одежд должны обеспечивать устойчивость к образованию на поверхности покрытия усталостных повреждений, проявляющихся в виде сетки трещин по полосам наката.

5.2 Характер и темпы усталостного повреждения определяются условиями работы дорожной одежды, включающими:

- интенсивность движения и состав транспортного потока;
- температурный режим функционирования асфальтобетонных слоёв;
- влажностный режим грунта земляного полотна и неукреплённых слоёв основания;

- конструктивные параметры дорожной одежды.

5.3 Настоящая методика предусматривает два уровня расчёта:

- стандартный уровень — применяется при суммарном числе приложений расчётной нагрузки за срок службы $\Sigma N_p \leq 50\ 000\ 000$. Расчёт выполняется с использованием фиксированных значений коэффициентов модели работоспособности и данных о расчетных модулях упругости асфальтобетонов, приведённых в ГОСТ Р 71404-2024;
- продвинутый уровень — применяется при ΣN_p > 50 000 000. Коэффициенты модели работоспособности и динамические модули упругости определяются индивидуально для каждого типа асфальтобетона на основе результатов лабораторных испытаний.

5.4 Прогнозирование усталостных повреждений асфальтобетонных слоёв базируется на законе линейного суммирования повреждений согласно которому каждое приложение нагрузки расходует часть усталостного ресурса материала, а разрушение наступает при исчерпании ресурса.

5.5 Расчётный срок службы дорожной одежды принимается в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58861 и ГОСТ Р 71404.

5.6 Расчёт выполняется помесячно за весь расчётный срок службы с учётом:

- изменения интенсивности движения по годам;
- внутригодового распределения интенсивности движения по месяцам;
- сезонного изменения температуры асфальтобетонных слоёв;
- сезонного изменения влажности грунта земляного полотна.

5.7 Расчёт ведётся на 365 дней в году.

5.8 Расчётная нагрузка принимается в соответствии с ГОСТ 32960: F = 115 кН, p = 800 кПа для дорог с капитальным типом дорожной одежды.

5.9 Динамический модуль упругости асфальтобетонных слоёв определяется в соответствии с выбранным уровнем расчёта (см п. 5.3):

- для продвинутого уровня — по результатам лабораторных испытаний по ГОСТ Р 58401.12-2019, ГОСТ Р 58401.21-2019;

- для стандартного уровня — с использованием таблиц Г.4 и Г.5 ГОСТ Р 71404-2024.

5.10 Расчетные модули упругости слоев оснований из не обработанных вяжущими материалов, обработанных вяжущими материалов, оснований, устроенных из шлаков и с использованием иных материалов переработки, а также модули упругости дополнительных слоев оснований и грунтов земляного полотна принимаются в соответствии с ГОСТ Р 71404.

## 6 Исходные данные для расчёта

6.1 Для выполнения расчёта необходимы следующие исходные данные:

6.1.1 Расчётный срок службы дорожной одежды по ГОСТ Р 58861.

6.1.2 Конструкция дорожной одежды:

- толщина каждого слоя, м;
- динамический модуль упругости асфальтобетонных слоёв при различных температурах, МПа;
- модуль упругости укреплённых и неукреплённых слоёв основания, МПа;
- модуль упругости грунта земляного полотна, МПа;
- коэффициент Пуассона каждого слоя (определяют по данным испытаний или принимают в соответствии с ГОСТ Р 71404).

6.1.2.1 При задании конструкции дорожной одежды толщина верхнего слоя покрытия (ВСП), учитываемая в расчёте напряжённо-деформированного состояния, должна быть уменьшена на величину максимально допустимой глубины колеи в соответствии с ГОСТ Р 50597. Толщина ВСП, соответствующая слою износа, в расчёте не учитывается.

6.1.3 Данные о транспортной нагрузке:

- среднесуточная интенсивность движения по месяцам на начало эксплуатации, авт./сут;
- состав транспортного потока (распределение по типам ТС в соответствии с ГОСТ 32965);
- коэффициент ежегодного прироста интенсивности движения.

6.1.4 Данные о температурном режиме:

- среднемесячная температура воздуха за период не менее 5 лет, °С.

6.1.5 Данные о влажностном режиме:

- среднемесячная влажность грунта земляного полотна;

6.2 При отсутствии прямых измерений динамического модуля упругости асфальтобетона допускается использовать значения, приведённые в Приложении Г ГОСТ Р 71404-2024, при этом расчёт относится к стандартному уровню

## 7 Расчёт суммарного числа приложений расчётной нагрузки

7.1 Суммарное число приложений расчётной нагрузки $\Sigma N_p$ определяется в соответствии с ГОСТ Р 71404-2024.

7.2 Коэффициенты приведения транспортных средств к расчётной осевой нагрузке $S_i$ принимаются по ГОСТ Р 71405-2024.

## 8 Моделирование температурного режима асфальтобетонных слоёв

### 8.1 Общие положения

8.1.1 Циклическое изменение прочностных и деформационных характеристик асфальтобетонных слоёв обусловлено годовым изменением температурного режима эксплуатации.

8.1.2 По среднестатистическим фактическим данным среднесуточной температуры воздуха на участке проектирования определяется ее медиана для каждого месяца.

### 8.2 Определение температуры покрытия

8.2.1 Температура асфальтобетонного покрытия определяется по формуле:

$$T_{\text{п}} = T_{\text{в}} * \left[1.5 + 0.5 * cos\frac{\pi * (n-7)}{6}\right] \quad (8.1)$$

где $T_{\text{п}}$ – температура покрытия, ºС;

$T_{\text{в}}$ – медиана среднесуточной температуры воздуха за период (месяц), ºС;

$n$ – порядковый номер месяца, начиная с января.

### 8.3 Определение температуры по глубине

8.3.1 Для определения динамических модулей упругости асфальтобетонных слоёв необходимо знать средние по толщине значения температуры слоя. Температура на любой глубине $h$ от поверхности покрытия вычисляется по формуле (8.2).

8.3.2 Изменение температуры по глубине пакета асфальтобетонных слоёв рассчитывается по формуле:

$$T_h = b * ln(0.01 * h + 1.0) + T\text{п}, \quad (8.2)$$

где • $T_h$ — температура на глубине h, °C;

$b$ – параметр, зависящий от $T_П$ (таблица 8.1);

$h$ – глубина от поверхности асфальтобетонного покрытия, мм.

Таблица 8.1 – Зависимость параметра b от температуры покрытия

| Тп, °C | -15 | -10 | -5 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| b | 8.5 | 6.5 | 4.5 | 2.5 | 0.7 | 0.1 | 0.3 | 0.4 | -1.6 | -4.0 | -6.2 | -8.5 | -10.5 |

*Примечание — Для промежуточных значений $T_n$ параметр b определяется линейной интерполяцией.*

**8.4 Определение динамического модуля упругости**

8.4.1 Для продвинутого уровня расчёта для каждого месяца и для каждого слоя асфальтобетона на основе рассчитанной температуры $T_h$ определяется динамический модуль упругости E.

Определение модуля для каждой температуры проводится с использованием мастер-кривой (частотно-температурной зависимости) динамического модуля упругости, полученной для данного типа асфальтобетона.

Построение мастер-кривой выполняется по результатам лабораторных испытаний на динамический модуль упругости при температурах (0°C, 20°C, 40°C или 0°C, 15°C, 30°C) и частотах нагружения (10 Гц, 1 Гц, 0,1 Гц) в соответствии с ГОСТ Р 58401.12-2019 или ГОСТ Р 58401.21-2019.

8.4.1.1 Для построения мастер-кривой по результатам лабораторных испытаний используется сигмоидальная модель, описывающая зависимость динамического модуля от приведённой частоты:

$$\log|E^*| = \log(|E^*|_{min}) + \frac{\log(|E^*|_{max}) - \log(|E^*|_{min})}{1 + e^{\beta+\gamma \log \omega_r}} \quad (8.3)$$

где:|E*| - динамический модуль упругости, МПа;

$\omega_r$ – приведенная частота, Гц;

$|E^*|_{max}$– верхнее асимптотическое значение модуля (определяется по модели Хирша, см. п. 8.4.1.4);

$|E^*|_{min}$– нижнее асимптотическое значение модуля (принимается равным 3,45 МПа);

β и γ - параметры формы кривой (-1) и 0,5 соответственно.

8.4.1.2 Приведённая частота $\omega_r$ вычисляется с использованием уравнения Аррениуса, реализующего принцип температурно-временной суперпозиции:

$$\log \omega_r = \log \omega + \frac{\Delta E_a}{19{,}14714}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right) \quad (8.4)$$

где: $\omega_r$ – приведенная частота при референтной температуре, Гц;

$\omega$ – частота нагружения при испытательной температуре, Гц;

$T_r$ – референтная температура, К (рекомендуется принимать равной 293,15 К, что соответствует 20 °С);

$T$- испытательная температура, К;

$\Delta E_a$ – энергия активации (подбирается как параметр калибровки, начальное приближение — 200 000 Дж/моль).

8.4.1.3 Коэффициент сдвига для приведения результатов к референтной температуре определяется по формуле:

$$\log [a(T)] = \frac{\Delta E_a}{19{,}14714}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right) \quad (8.5)$$

где: $a(T)$ – коэффициент сдвига при температуре Т.

8.4.1.4 Верхнее асимптотическое значение модуля Max в МПа определяется по модели Хирша на основе объёмных характеристик асфальтобетонной смеси:

$$|E^*|_{max} = P_c + \left[42000000\left(1 - \frac{\text{ПМЗ}}{100}\right) + 435000\left(\frac{\text{ПНБ} * \text{ПМЗ}}{10000}\right]\right. \\ \left. + \frac{1 - P_c}{\left[\frac{\left(1 - \frac{\text{ПМЗ}}{100}\right)}{42000000} + \frac{\text{ПМЗ}}{435000 * \text{ПНБ}}\right]}\right. \quad (8.6)$$

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{435000 + \text{ПНБ}}{\text{ПМЗ}}\right)^{0,58}}{650 + \left(\frac{435000 + \text{ПНБ}}{\text{ПМЗ}}\right)^{0,58}} \quad (8.7)$$

где: ПМЗ – содержание пустот в минеральном заполнителе в асфальтобетоне, %;

ПНБ – содержание пустот наполненных битумным вяжущим в асфальтобетоне, %.

8.4.1.5 Подбор параметров $|E^*|_{min}$, $\beta$, $\gamma$ и $\Delta E_a$ выполняется методом наименьших квадратов путём минимизации суммы квадратов отклонений расчётных значений динамического модуля от экспериментальных данных. Рекомендуемые начальные приближения: $|E^*|_{min}$=3,45 МПа, $\beta$ = -1, $\gamma$ = 0.5, $\Delta E_a$ = 200 000 Дж/моль.

Для каждого испытания по формуле (8.4) вычисляется приведённая частота и вычисляется расчётное значение динамического модуля $E_i^*$, Мпа. по формуле (8.3). Для каждого испытания вычисляется квадрат отклонения $\delta_i^2$ (в логарифмической шкале) по формуле 8.8 и суммарная ошибка $SSE$ по формуле 8.9.

$$\delta_i^2 = (\log(E_i^*) - \log(|E^*|_{min}))^2 \quad (8.8)$$

где: $E_i^*$, — измеренный динамический модуль, МПа.

$$SSE = \sum_{i=1}^{N} \delta_i^2 \quad (8.9)$$

где: $N$ — общее число испытаний (например, 3 температуры × 3 часты = 9 испытаний).

Необходимо подобрать такие значения $\beta$, $\gamma$ и $\Delta E_a$, чтобы величина $SSE$ была минимальной. Для этого используется численный метод оптимизации. В Microsoft Excel для этой цели применяется надстройка «Поиск решения» (Solver).

8.4.2 Для стандартного уровня расчета, при отсутствии лабораторных данных определения динамического модуля упругости в соответствии с ГОСТ Р 58401.12-2019 и ГОСТ Р 58401.21 допускается использование кратковременных модулей упругости асфальтобетона, приведённых в таблицах Г.4 и Г.5 ГОСТ Р 71404-2024, с последующей интерполяцией по температуре.

8.4.3 При использовании таблиц Г.4 и Г.5 ГОСТ Р 71404-2024 для определения динамических модулей упругости значения модулей приведены для диапазона температур от 0°С до 50°С.

Для определения модулей упругости при температурах ниже 0°С допускается экстраполяция значений по полиномиальной зависимости второго порядка, построенной по точкам из таблиц Г.4 и Г.5 ГОСТ Р 71404-2024 в диапазоне температур 0–50°С.

8.4.4 Для каждого типа асфальтобетона строится аппроксимирующая зависимость *E(T)* в виде полинома второй степени:

$$E(T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c, \quad (8.10)$$

где: *E(T)* — динамический модуль упругости, МПа;

*T* — температура, °С;

*a, b, c* — коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов по данным таблиц Г.4 и Г.5 ГОСТ Р 71404-2024 для температур 0, 10, 20, 30, 40, 50°С.

## 9 Моделирование влажностного режима грунта земляного полотна

9.1 При расчёте конструкций дорожных одежд по критерию накопления усталостных повреждений в асфальтобетонных слоях учитывается сезонное изменение модуля упругости грунта земляного полотна, обусловленное изменением его влажности.

9.2 При наличии фактических данных о среднемесячной влажности грунта земляного полотна эти данные используются непосредственно.

9.3 При отсутствии фактических данных среднемесячная влажность грунта

определяется расчётным методом на основе:

- данных о количестве осадков за период не менее 5 лет;
- данных о температуре воздуха;
- типа грунта по гранулометрическому составу;
- коэффициента уплотнения грунта;
- типа местности по условиям увлажнения.

9.4 В зависимости от изменения относительной влажности грунта земляного полотна определяется модуль упругости (в соответствии с Приложением В ГОСТ 71404).

# 10 Расчёт напряжённо-деформированного состояния многослойной конструкции

## 10.1 Общие положения

10.1.1 Относительная деформация растяжения на нижней границе пакета асфальтобетонных слоёв $\varepsilon_i$ является основным механическим параметром, определяющим накопление усталостных повреждений, и вычисляется по формуле 10.1.

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E_j}\left[\sigma_r^{(j)} - \nu_j\left(\sigma_\theta^{(j)} + \sigma_z^{(j)}\right)\right] \qquad (10.1)$$

где: $E_j$ - динамический модуль упругости j-го слоя, МПа;

$\sigma_r^{(j)}$ – радиальное нормальное напряжение, МПа;

$\sigma_\theta^{(j)}$ - окружное нормальное напряжение, МПа;

$\sigma_z^{(j)}$ – нормальное вертикальное напряжение, МПа.

Выражения для нормальных напряжений представлены в приложении Б.

10.1.2 Расчёт $\varepsilon_i$ выполняется на основе точного решения теории упругости для многослойного полупространства под воздействием расчётной нагрузки.

10.1.3 Расчёт осуществляется с учётом температуры и влажности по месяцам в течение каждого года за весь расчётный срок службы.

## 10.2 Расчётная схема

10.2.1 В качестве расчётной схемы нагружения конструкции колесом

автомобиля принимается круглый штамп диаметром $D_Д$, передающий равномерно распределённую нагрузку с давлением $p$.

10.2.2 Многослойная конструкция представляется в виде системы упругих слоёв, каждый из которых характеризуется толщиной $h_j$, динамическим модулем упругости $E_j$ и коэффициентом Пуассона $v_j$.

### 10.3 Метод расчёта

10.3.1 Расчёт напряжённо-деформированного состояния многослойной конструкции выполняется на основе точного решения осесимметричной задачи теории упругости для многослойного полупространства в соответствии с ОДМ 218.3.1.005-2021. Математическая постановка задачи и метод решения приведены в Приложении Б.

10.3.2 В результате расчёта для каждого месяца каждого года определяются компоненты напряжений и деформаций в любом слое конструкции.

## 11 Расчёт накопления усталостных повреждений

### 11.1 Общие положения

11.1.1 Расчёт дорожной конструкции по критерию сопротивления усталостному разрушению проводится путём анализа величины D — доли накопленных повреждений за период эксплуатации дороги T лет.

11.1.2 Расчёт основан на линейной гипотезе суммирования повреждений (Пальмгрена—Майнера), согласно которой каждое приложение нагрузки независимо от других расходует часть ресурса конструкции, а разрушение наступает при исчерпании ресурса.

11.1.3 Общая доля накопленных повреждений определяется по формуле:

$$D = \sum_{t=1}^{T} D(t) = \sum_{t=1}^{T} \frac{n_t}{N(\varepsilon_t)} \qquad (11.1)$$

где $t$- порядковый номер года эксплуатации дорожной одежды ($t$ = 1, 2, ..., $T_{сл}$);

$n_t$ - фактическое число приложений нагрузок в течение t-го года эксплуатации;

$N(\varepsilon_t)$ – допустимое количество приложений нагрузок при циклических деформациях в *t*-м году, определяемое по формуле (11.3) для каждого месяца *t*-го года с последующим суммированием;

*D(t)* — доля накопленных повреждений на конец *t*-го года эксплуатации.

**11.2 Помесячная дискретизация**

11.2.1 Для обеспечения точности прогноза расчётный период разбивается на месячные интервалы (i = 1, 2, ..., 12) в течение каждого года эксплуатации. Годовое накопление повреждений определяется как сумма помесячных значений:

$$D(t) = \frac{n_t}{N(\varepsilon_t)} = \sum_{i=1}^{12} \frac{\Sigma N_{pi}}{N_{fi}} \qquad (11.2)$$

где $\Sigma N_{pi}$ – суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки к точке на поверхности конструкции за *i*-й месяц *t*-го года, определяемое с учетом показателя изменения интенсивности движения по годам и среднемесячного распределения интенсивности транспортного потока;

$N_{fi}$ – допустимое число приложений нагрузок при заданном режиме деформирования за *i*-й месяц *t*-го года.

11.2.2 Суммарное число приложений расчётной нагрузки за месяц $\Sigma N_p$ определяется в соответствии с ГОСТ 71404-2024

**11.3 Допустимое число приложений нагрузки**

11.3.1 Допустимое количество приложений нагрузок при заданном режиме деформирования асфальтобетонного покрытия рассчитывается по формуле:

$$N_{fi}(\varepsilon_i) = C_f \cdot K_1 \cdot {\varepsilon_i}^{K_2} \cdot {E_{ниж\ i}}^{K_3} \qquad (11.3)$$

где $C_f$ - поправочный коэффициент, принимаемый равным 0.433;

$K_1$ , $K_2$ , $K_3$ – эмпирические коэффициенты, определяемые в зависимости от уровня расчёта (см. 11.3.2);

$\varepsilon_i$ – относительная деформация растяжения на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев;

$E_{\text{ниж}\,i}$ – модуль упругости нижнего слоя асфальтобетона, вычисленный с учетом температурного режима *i*-го месяца, МПа.

11.3.2 Выбор уровня расчёта осуществляется в соответствии с п. 5.3. Значения коэффициентов зависят от уровня расчета.

Стандартный уровень — используются фиксированные значения коэффициентов:

$K_1 = 1.200, K_2 = -3.220, K_3 = -0.995$

Продвинутый уровень — коэффициенты $K_1$, $K_2$, $K_3$ определяются индивидуально для каждого типа асфальтобетона на основе:

- результатов лабораторных испытаний на усталость ГОСТ Р 59280-2020;
- построения корреляционной зависимости между логарифмом относительной начальной деформации и логарифмом количества циклов нагружения;
- последующей калибровки по данным натурных наблюдений в соответствии с разделом 13.

**11.4 Алгоритм расчёта накопления повреждений**

11.4.1 Расчёт выполняется последовательно по годам и месяцам в следующем порядке:

1. Для каждого месяца *i* каждого года *t*:

- определить температуру покрытия $T_п$ и среднюю по толщине слоя $T_h$ (раздел 8);
- определить динамический модуль упругости каждого асфальтобетонного слоя $E_j$ (раздел 8);
- определить модуль упругости грунта $E_{грунт}$ по влажности (раздел 9);
- выполнить расчёт НДС многослойной конструкции и определить относительную деформацию растяжения $\varepsilon_i$ на нижней границе пакета (раздел 10);
- определить допустимое число приложений нагрузки $N_{fi}$ по формуле (11.3);
- определить фактическое число приложений нагрузки за месяц $\Sigma N_{pi}$;

- вычислить долю повреждений за месяц:

$$D = \frac{\Sigma N_{pi}}{N_{fi}} \qquad (11.4)$$

2. Суммировать доли повреждений за все месяцы всех лет:

3. Определить площадь сетки усталостных трещин *S* по формуле (12.1)

# 12 Критерии оценки прочности и определение площади сетки трещин

## 12.1 Определение площади сетки трещин

12.1.1 Рассчитанные значения доли накопленных повреждений D связываются с площадью усталостных разрушений в виде сетки трещин, проявляющейся на асфальтобетонном покрытии нежёсткой дорожной одежды.

12.1.2 Соотношение между расчётными значениями доли накопленных повреждений и площадью сетки трещин в процентах от площади полос движения описывается следующей зависимостью:

$$S = \frac{100}{1 + e^{4.846 - 2.423 lg D(t)}} \qquad (12.1)$$

где:

*S* — площадь полос движения, покрытая сеткой усталостных трещин, %;

*D(t)* — доля накопленных усталостных повреждений на конец *t*-го года эксплуатации.

12.1.3 Графическое представление зависимости (12.1) приведено на рисунке 12.1.

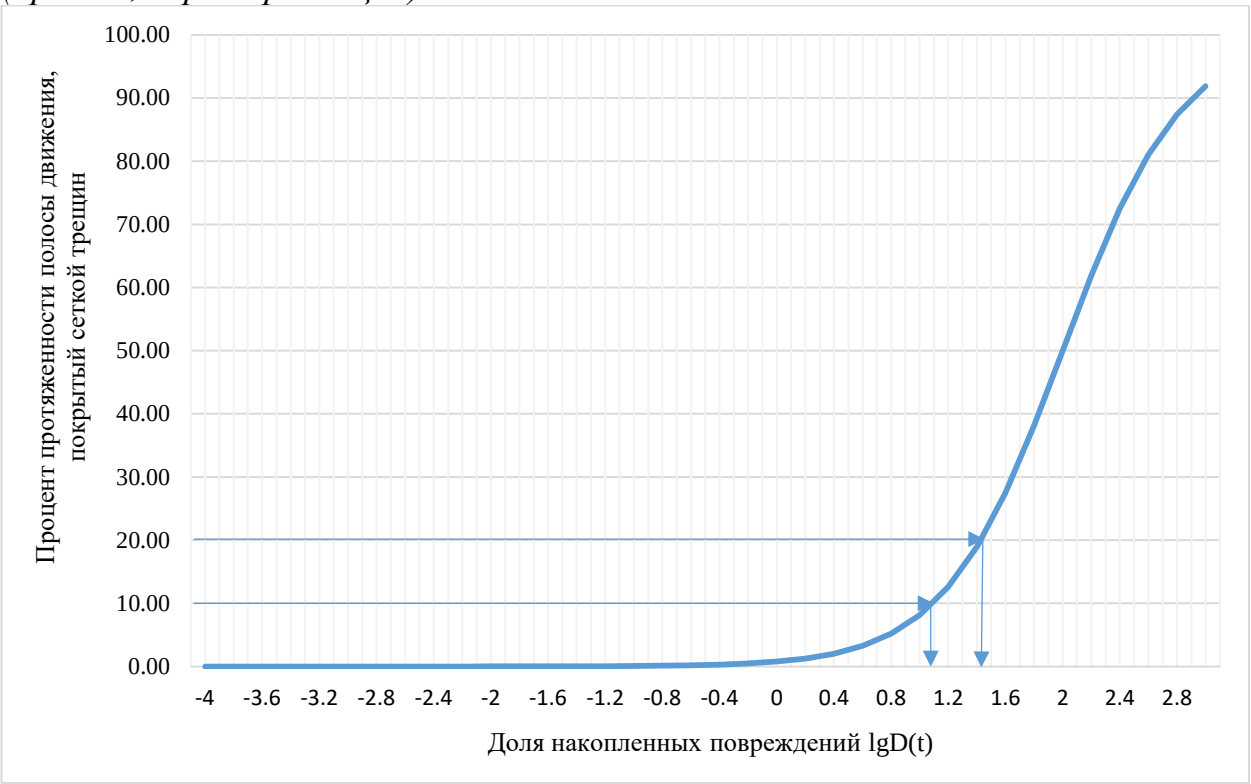


Рисунок 12.1 — Соотношение между долей накопленных повреждений и площадью сетки усталостных трещин

12.1.4 Зависимость (12.1) получена по результатам калибровки на участках автомобильных дорог с фиксированной площадью сетки усталостных трещин и может уточняться по мере накопления статистических данных.

**12.2 Критерий отказа дорожной конструкции**

12.2.1 Предельные значения площади покрытия, покрытой сеткой усталостных трещин, свидетельствующие об отказе конструкции дорожной одежды, принимаются в соответствии с ГОСТ Р 59120 и приведены в таблице 12.1.

Таблица 12.1 — Критерий отказа конструкции дорожной одежды по показателю усталостного повреждения асфальтобетонных слоёв

| Тип дорожной одежды | Категория дороги | Предельный коэффициент разрушения | Предельное значение площади покрытия с сеткой усталостных трещин $S_{пред}$, % |
|---|---|---|---|
| Капитальный | Ia, Iб, Iв | 0,10 | 10 |
| | II | 0,10 | 10 |
| | III | 0,20 | 20 |

12.2.2 Дорожная одежда считается удовлетворившей критерию расчёта по

усталостному разрушению, если на конец расчётного срока службы выполняется условие:

$$S(T_{сл}) \leq S_{пред} \qquad (12.2)$$

где:

$S(T_{сл})$ — расчётная площадь сетки усталостных трещин на конец расчётного срока службы, %;

$S_{пред}$ — предельное значение площади сетки усталостных трещин по таблице 12.1, %.

12.2.3 При несоблюдении условия (12.2) рекомендуется:

– увеличить толщину асфальтобетонных слоёв;

– применить в нижнем слое асфальтобетонного пакета материалы с более высокими усталостными характеристиками (в том числе с модифицированными битумными вяжущими);

– предусмотреть мероприятия по усилению конструкции;

– выполнить повторный расчёт с изменёнными параметрами.

12.2.4 Единственным критерием оценки сопротивления дорожной одежды усталостному разрушению является выполнение условия (12.2). Расчётное значение доли накопленных повреждений D является промежуточным параметром, не подлежащим нормированию.

**12.3 Определение фактического срока службы**

12.3.1 Фактический срок службы дорожной одежды до достижения предельного значения $S_{пред}$ определяется путём обратного расчёта — подбором года *t*, при котором выполняется условие:

$$S(t) \leq S_{пред} \qquad (12.3)$$

12.3.2 Для этого необходимо:

– выполнить расчёт накопления повреждений для каждого года эксплуатации по формуле (11.5);

– определить площадь сетки трещин *S(t)* для каждого года по формуле (12.1);

– найти год *t*, в котором *S(t)* впервые достигает или превышает $S_{пред}$.

12.3.3 Рекомендуется строить график накопления повреждений *S(t)* за весь расчётный период для визуальной оценки динамики разрушения и определения фактического срока службы.

# 13 Калибровка расчётной модели по данным натурных наблюдений

## 13.1 Общие положения

13.1.1 Для продвинутого уровня расчёта коэффициенты $K_1$, $K_2$, $K_3$ определяются индивидуально для каждого типа асфальтобетона на основе результатов лабораторных испытаний на усталость.

13.1.2 Калибровка коэффициентов выполняется методом наименьших квадратов по данным испытаний образцов асфальтобетона при различных уровнях деформирования и температурах.

## 13.2 Исходные данные для калибровки

13.2.1 Для калибровки необходимы следующие данные лабораторных испытаний:

а) относительная деформация растяжения $\varepsilon_i$, мкм/м;

б) динамический модуль упругости $E_i$, МПа;

в) число циклов нагружения до разрушения $Nf_i$.

Испытания должны проводиться в соответствии ГОСТ Р 59280-2020 обеспечивающим определение корреляционной зависимости между логарифмом относительной начальной деформации и логарифмом количества циклов нагружения для конкретного типа асфальтобетона.

## 13.3 Метод наименьших квадратов

Модель расчета накопления повреждений в слоях асфальтобетона основывается на расчетной формуле:

$$N_f = C_f \cdot K_1 \cdot {\varepsilon_i}^{K_2} \cdot {E_{ниж\ i}}^{K_3} \quad (13.1)$$

где $N_f$ – заданный усталостный ресурс;

$C_f$ - поправочный коэффициент, принимаемый равным 0.433;

$K_1$ , $K_2$ , $K_3$ – коэффициенты аппроксимации, подлежащие определению;

$\varepsilon_i$ – относительная деформация растяжения на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев;

$E_{\text{ниж}\,i}$ – модуль упругости нижнего слоя асфальтобетона, вычисленный с учетом температурного режима $i$-го месяца, МПа.

В общем случае модель является двухпараметрической. Параметрами являются величины $\varepsilon_h$ и $E$. В данной постановке необходимо определить коэффициенты $K_1, K_2, K_3$ по экспериментально полученным значениям из таблицы: $N_{fij} = f(\varepsilon_{hi}, E_j\ )$.

При упрощенной постановке задачи величина $E$ принимается заданной 14000, а коэффициент $K_3$ считается равным по умолчанию -0.854.

Тогда после логарифмирования (13.1):

$$\ln(N_f) = \mathrm{C} + \ln(K_1) + K_2 \cdot \ln(\varepsilon_h\ ),$$
$$\mathrm{C} = \ln(C_f) + K_3 \cdot \ln(E) = const \quad (13.2)$$

Линейная зависимость вида:

$$y = a \cdot x + b, \quad (13.3)$$

где $y = \ln(N_f) - \mathrm{C},\ x = \ln(\varepsilon_h\ ),\ \ a = K_2,\ \ b = \ln(K_1).$

Считается, что из эксперимента известны значения $x_i, y_i,\ \ i = 1,2, \dots, N.$

Например

| i | $\varepsilon_{hi}$ | $N_{fi}$ | $x = \ln(\varepsilon_{hi})$ | $y = \ln(N_{fi})$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 105 | 55000 | 4.65 | 10.915 |
| 2 | 150 | 8500 | 5.01 | 9.048 |
| … | | | | |
| N | 240 | 900 | 5.48 | 6.802 |

Для определения коэффициентов линейной регрессии $a, b$ используют метод наименьших квадратов, минимизирующий функцию ошибки аппроксимации:

$$E_r(a,b) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}(a \cdot x_i + b - y_i)^2. \quad (13.4)$$

Приравнивая к нулю частные производные $\frac{\partial E_r(a,b)}{\partial a}$, $\frac{\partial E_r(a,b)}{\partial b}$, получают систему двух линейных алгебраических уравнений относительно $a, b$:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{N} x_i^2 & \sum_{i=1}^{N} x_i \\ \sum_{i=1}^{N} x_i & N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{N} x_i \cdot y_i \\ \sum_{i=1}^{N} y_i \end{pmatrix} \quad (13.5)$$

Определив $a, b,$ находят необходимые нам коэффициенты $K_1 = \exp(b),\ K_2 = a$.

Для контроля вычислений $K_1$ должен быть положительным, $K_2$ – отрицательным.

# Приложение А

## Блок-схема алгоритма расчёта

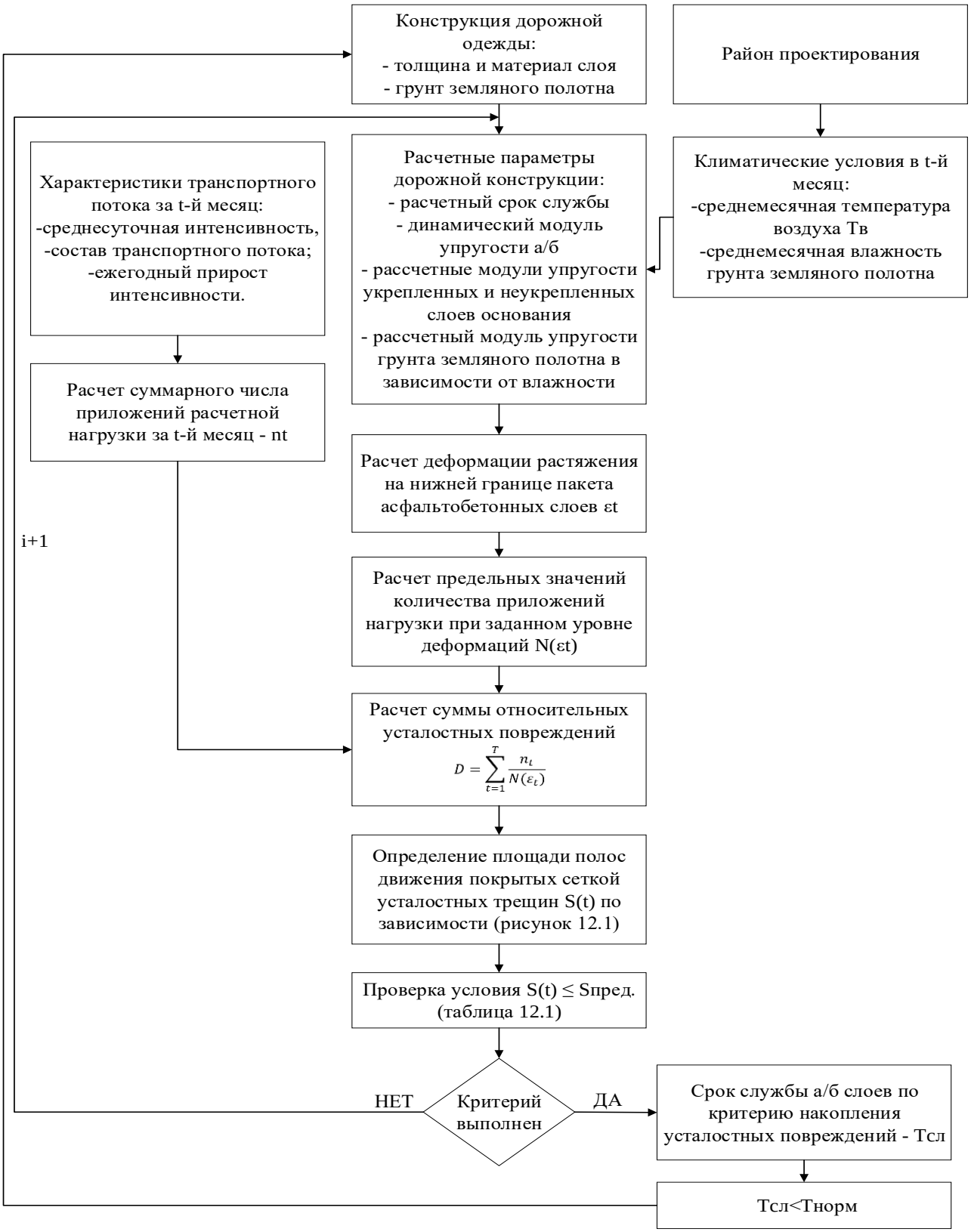


Рисунок А.1 – Блок схема расчёт накопления усталостных повреждений

# Приложение Б (обязательное). Математическая постановка задачи и метод расчёта напряжённо-деформированного состояния многослойной конструкции

## Б.1 Математическая постановка задачи

Б.1.1 Решение задачи об определении напряжённо-деформированного состояния многослойной среды выполняется в цилиндрической системе координат (r, θ, z).

Б.1.2 Для каждого слоя решается система уравнений равновесия при отсутствии массовых сил:

$$\nabla \cdot \sigma = 0 \qquad \text{(Б.1)}$$

Б.1.3 Определяющие соотношения задаются в форме закона Гука для изотропного упругого материала.

Б.1.4 Граничные условия на поверхности слоистой среды:

$$\sigma_z^{(N)}(r, z_N) = p(r), \qquad \tau_{rz}^{(N)}(r, z_N) = 0 \qquad \text{(Б.2)}$$

где:

N — номер верхнего слоя;

p(r) — распределение давления по площади штампа.

Б.1.5 На границах раздела слоёв обеспечиваются условия жёсткого сцепления:

$$\sigma_z^{(j)} = \sigma_z^{(j+1)}, \qquad \tau_{rz}^{(j)} = \tau_{rz}^{(j+1)}, \qquad u_z^{(j)} = u_z^{(j+1)}, \qquad u_r^{(j)} = u_r^{(j+1)} \qquad \text{(Б.3)}$$

Б.1.6 В полупространстве (последний слой) перемещения и напряжения затухают на бесконечности:

$$u_z^{(N)} \to 0, \qquad \sigma_z^{(N)} \to 0 \ \text{ при } z \to 0 \qquad \text{(Б.4)}$$

## Б.2 Метод решения

Б.2.1 Решение задачи для однородного полупространства.

Б.2.1.1 В основу построения положено решение уравнения равновесия при выполнении определяющих соотношений в форме закона Гука для изотропного однородного полупространства (z < 0) и заданном векторе поверхностных усилий R = (R₁, R₂):

$$\left(\sigma_z^{(1)}(r,0),\ \tau_{rz}^{(1)}(r,0)\right) = \left(R_1(r),\ R_2(r)\right) \tag{Б.5}$$

Б.2.1.2 Для решения применяется представление Тередзавы с использованием функции Лява χ(r, z), удовлетворяющей бигармоническому уравнению:

$$\nabla^2\nabla^2\chi(r,z) = 0 \tag{Б.6}$$

Б.2.1.3 С использованием интегрального преобразования Ханкеля:

$$\tilde{\chi}(\alpha,z) = (A + \alpha z B)e^{\alpha z} \tag{Б.7}$$

Б.2.1.4 Удовлетворение граничным условиям (Б.5) приводит к следующим выражениям, определяющим напряжённо-деформированное состояние в области D₁:

$$u_z^{(1)}(r,z) = \frac{1}{2\mu_1}\int_0^\infty [(2-2\nu_1-\alpha z)\tilde{R}_1(\alpha) + (1-2\nu_1-\alpha z)\tilde{R}_2(\alpha)]\, e^{\alpha z} J_0(\alpha r)\, d\alpha \tag{Б.8}$$

$$u_r^{(1)}(r,z) = \frac{1}{2\mu_1}\int_0^\infty [(1-2\nu_1+\alpha z)\tilde{R}_1(\alpha) + (2-2\nu_1+\alpha z)\tilde{R}_2(\alpha)]\, e^{\alpha z} J_1(\alpha r)\, d\alpha \tag{Б.9}$$

$$\sigma_z^{(1)}(r,z) = \int_0^\infty [(1-\alpha z)\tilde{R}_1(\alpha) - \alpha z\tilde{R}_2(\alpha)]\, e^{\alpha z} J_0(\alpha r)\alpha\, d\alpha \tag{Б.10}$$

$$\tau_{rz}^{(1)}(r,z) = \int_0^\infty [\alpha z\tilde{R}_1(\alpha) + (1+\alpha z)\tilde{R}_2(\alpha)]\, e^{\alpha z} J_1(\alpha r)\alpha\, d\alpha \tag{Б.11}$$

$$\sigma_r^{(1)}(r,z) = \int_0^\infty [(1+\alpha z)\tilde{R}_1(\alpha) + (2+\alpha z)\tilde{R}_2(\alpha)]\, e^{\alpha z} J_0(\alpha r)\alpha d\alpha - \int_0^\infty [(1-2\nu_1+\alpha z)\tilde{R}_1(\alpha) + (2-2\nu_1+\alpha z)\tilde{R}_2(\alpha)]\, e^{\alpha z}\frac{J_1(\alpha r)}{r} d\alpha \quad (Б.12)$$

$$\sigma_\theta^{(1)}(r,z) = \int_0^\infty [2\nu_1\tilde{R}_1(\alpha) + 2\nu_1\tilde{R}_2(\alpha)]\, e^{\alpha z} J_0(\alpha r)\alpha d\alpha + \int_0^\infty [(1-2\nu_1+\alpha z)\tilde{R}_1(\alpha) + (2-2\nu_1+\alpha z)\tilde{R}_2(\alpha)]\, e^{\alpha z}\frac{J_1(\alpha r)}{r} d\alpha \quad (Б.13)$$

где:

$$\tilde{R}_1(\alpha) = \int_0^\infty R_1(r) r J_0(\alpha r) dr, \qquad \tilde{R}_2(\alpha) = \int_0^\infty R_2(r) r J_1(\alpha r) dr \quad (Б.14)$$

$$\mu_1 = \frac{E_1}{2(1+\nu_1)} \quad (Б.15)$$

Б.2.2 Решение задачи для слоя

Б.2.2.1 Рассматривается j-й слой, входящий в структуру N-слойного полупространства, в локальной цилиндрической системе координат (r, θ, z):

$$D_j = \{r \in (0,+\infty), \qquad \theta \in (0,2\pi), \qquad z \in (-h_j, 0)\} \quad (Б.17)$$

Б.2.2.2 Пусть на гранях слоя заданы векторы напряжений:

при z = -$h_j$:

$$\left(\sigma_z^{(j)}(r,-h_j),\ \tau_{rz}^{(j)}(r,-h_j)\right) = \left(R_3(r),\ R_4(r)\right) \quad (Б.18)$$

при z = 0:

$$\left(\sigma_z^{(j)}(r,0),\ \tau_{rz}^{(j)}(r,0)\right) = \left(R_5(r),\ R_6(r)\right) \qquad \text{(Б.19)}$$

Б.2.2.3 Решение для НДС слоя разыскивается по принципу суперпозиции в виде суммы двух функций, определяющих слой как наложение двух полупространств:

первое — для z < 0;

второе — для z > -$h_j$.

$$f^{(j)}(r,z) = f^{(j,1)}(r,z) + f^{(j,2)}(r,z) \qquad \text{(Б.20)}$$

Например, для перемещения $u_z^{(j)}$:

$$u_z^{(j)}(r,z) = u_z^{(j,1)}(r,z) + u_z^{(j,2)}(r,z) \qquad \text{(Б.21)}$$

где $u_z^{(j,1)}(r,z)$ соответствует формулfv (Б.8)—( Б.13) с заменой параметров среды $\nu_1, \mu_1$ на $\nu_j, \mu_j$ и функций $\tilde{R}_1(\alpha), \tilde{R}_2(\alpha)$ на $\tilde{R}_5(\alpha), \tilde{R}_6(\alpha)$. Аналогично для функций

$$u_r^{(j,1)}(r,z), \sigma_z^{(j,1)}(r,z), \tau_{rz}^{(j,1)}(r,z), \sigma_r^{(j,1)}(r,z), \sigma_\theta^{(j,1)}(r,z).$$

Б.2.2.4 Функция $u_z^{(j,2)}(r,z)$, определяющая влияние границы $z = -h_j$, с учётом условий симметрии и выбора системы координат, имеет вид:

$$u_z^{(j,2)}(r,z) = \frac{1}{2\mu_j}\int_0^\infty \left[-\left(2-2\nu_j+\alpha(h_j+z)\right)\tilde{R}_3(\alpha) + \left(1-2\nu_j+\alpha(h_j+z)\right)\tilde{R}_4(\alpha)\right] e^{-\alpha(h_j+z)} J_0(\alpha r)\, d\alpha \qquad \text{(Б.22)}$$

$$u_r^{(j,2)}(r,z) = \frac{1}{2\mu_j}\int_0^\infty \left[\begin{matrix}\left(1-2\nu_j-\alpha(h_j+z)\right)\tilde{R}_3(\alpha) - \\ \left(2-2\nu_j-\alpha(h_j+z)\right)\tilde{R}_4(\alpha)\end{matrix}\right] e^{-\alpha(h_j+z)} J_1(\alpha r)\, d\alpha \qquad \text{(Б.23)}$$

$$\sigma_z^{(j,2)}(r,z) = \int_0^\infty \left[\left(1+\alpha(h_j+z)\right)\tilde{R}_3(\alpha) - \alpha(h_j + z)\tilde{R}_4(\alpha)\right] e^{-\alpha(h_j+z)} J_0(\alpha r)\alpha\, d\alpha \qquad \text{(Б.24)}$$

$$\tau_{rz}^{(j,2)}(r,z)=\int_0^\infty\left[\alpha(h_j+z)\tilde{R}_3(\alpha)+(1-\alpha(h_j+z))\tilde{R}_4(\alpha)\right]e^{-\alpha(h_j+z)}J_1(\alpha r)\alpha d\alpha \quad (Б.25)$$

$$\sigma_r^{(j,2)}(r,z)=\int_0^\infty\left[\left(1-\alpha(h_j+z)\right)\tilde{R}_3(\alpha)-\left(2-\alpha(h_j+z)\right)\tilde{R}_4(\alpha)\right]e^{-\alpha(h_j+z)}J_0(\alpha r)\alpha d\alpha- \quad (Б.26)$$

$$\int_0^\infty\left[-\left(1-2\nu_j-\alpha(h_j+z)\right)\tilde{R}_3(\alpha)+\left(2-2\nu_j-\alpha(h_j+z)\right)\tilde{R}_4(\alpha)\right]e^{-\alpha(h_j+z)}\frac{J_1(\alpha r)}{r}d\alpha \quad (Б.27)$$

$$\sigma_\theta^{(j,2)}(r,z)=\int_0^\infty\left[2\nu_j\tilde{R}_3(\alpha)-2\nu_j\tilde{R}_4(\alpha)\right]e^{-\alpha(h_j+z)}J_0(\alpha r)\alpha d\alpha+ \quad (Б.28)$$

$$\int_0^\infty\left[\left(1-2\nu_j-\alpha(h_j+z)\right)\tilde{R}_3(\alpha)-\left(2-2\nu_j-\alpha(h_j+z)\right)\tilde{R}_4(\alpha)\right]e^{-\alpha(h_j+z)}\frac{J_1(\alpha r)}{r}d\alpha \quad (Б.29)$$

Б.2.2.5 Компоненты тензора малых деформаций для всех составляющих слоистой среды могут быть вычислены по формулам:

$$\varepsilon_z^{(j)}=\frac{\sigma_z^{(j)}-\nu_j\left(\sigma_r^{(j)}+\sigma_\theta^{(j)}\right)}{E_j},\ \varepsilon_r^{(j)}=\frac{\sigma_r^{(j)}-\nu_j\left(\sigma_z^{(j)}+\sigma_\theta^{(j)}\right)}{E_j},\ \varepsilon_\theta^{(j)}=\frac{\sigma_\theta^{(j)}-\nu_j\left(\sigma_r^{(j)}+\sigma_z^{(j)}\right)}{E_j},\quad \varepsilon_{rz}^{(j)}=\frac{\tau_{rz}^{(j)}}{\mu_j},\quad j=1,2,\ldots,N. \quad (Б.30)$$

Б.3 Построение решения для многослойного полупространства

Б.3.3.1 Для вычисления компонент напряжений и перемещений в многослойной среде необходимо воспользоваться формулами (Б.8)—( Б.13) и (Б.22)—( Б.29). Вначале рассматривается случай (N=2) двухслойного полупространства. В данных формулах функции $\tilde{R}_k(\alpha), k=1,2,\ldots,6$

являются неизвестными. Для их определения используются условия сопряжения слоев (Б.1) и граничные условия (Б.2) в преобразованном по Ханкелю виде:

$$\begin{cases} \tilde{\sigma}_z^{(j)}(\alpha, z_j) - \tilde{\sigma}_z^{(j+1)}(\alpha, z_j) = 0 \\ \tilde{\tau}_{rz}^{(j)}(\alpha, z_j) - \tilde{\tau}_{rz}^{(j+1)}(\alpha, z_j) = 0 \\ \tilde{u}_z^{(j)}(\alpha, z_j) - \tilde{u}_z^{(j+1)}(\alpha, z_j) = 0 \\ \tilde{u}_r^{(j)}(\alpha, z_j) - \tilde{u}_r^{(j+1)}(\alpha, z_j) = 0 \\ \tilde{\sigma}_z^{(N)}(\alpha, z_N) = \tilde{p}(\alpha) \\ \tilde{\tau}_{rz}^{(N)}(\alpha, z_N) = 0 \end{cases}, \quad \text{j=1, N=2} \qquad \text{(Б.31)}$$

При каждом фиксированном параметре преобразования Ханкеля $\alpha$ необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений вида:

$$\mathrm{A}(\alpha) \cdot \widetilde{\mathrm{R}}(\alpha) = \mathrm{B}(\alpha), \qquad \text{(Б.32)}$$

где $\widetilde{\mathrm{R}}(\alpha) = \left(\tilde{R}_1(\alpha), \dots, \tilde{R}_6(\alpha)\right)^{\boldsymbol{T}}$ – вектор-столбец неизвестных функций, $\mathrm{B}(\alpha)=(0,0,0,0,\tilde{p}(\alpha),0)^{\boldsymbol{T}}$ - вектор-столбец правых частей системы, $\mathrm{A}(\alpha)$ - матрица системы (Б.36).

Через введение вспомогательных матриц:

$$K0^{(j)} = \begin{pmatrix} 1-\nu_j & 0.5-\nu_j \\ 0.5-\nu_j & 1-\nu_j \end{pmatrix},$$

$$Kh^{(j)} = \begin{pmatrix} 1-\nu_j+\alpha h_j/2 & (1-2\nu_j+\alpha h_j)/2 \\ (1-2\nu_j-\alpha h_j)/2 & 1-\nu_j-\alpha h_j/2 \end{pmatrix} e^{-\alpha h_j}, \qquad \text{(Б.33)}$$

$$Lh^{(j)} = \begin{pmatrix} 1+\alpha h_j & \alpha h_j \\ -\alpha h_j & 1-\alpha h_j \end{pmatrix}$$

матрица $\mathrm{A}(\alpha)$ может быть записана в виде:

$$\mathrm{A}(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & -Lh_{11}^{(2)} & -Lh_{12}^{(2)} \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -Lh_{21}^{(2)} & -Lh_{22}^{(2)} \\ K0_{11}^{(1)} & K0_{12}^{(1)} & K0_{11}^{(2)}\gamma_2 & -K0_{12}^{(2)}\gamma_2 & -Kh_{11}^{(2)}\gamma_2 & -Kh_{12}^{(2)}\gamma_2 \\ K0_{21}^{(1)} & K0_{22}^{(1)} & -K0_{21}^{(2)}\gamma_2 & K0_{22}^{(2)}\gamma_2 & -Kh_{21}^{(2)}\gamma_2 & -Kh_{22}^{(2)}\gamma_2 \\ 0 & 0 & Lh_{11}^{(2)} & -Lh_{12}^{(2)} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -Lh_{21}^{(2)} & Lh_{22}^{(2)} & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{(Б.34)}$$

$\gamma_j = \mu_{j-1}/\mu_j.$

Б.3.3.5 Добавление нового слоя с индексом $j = 3$ приводит к увеличению числа неизвестных функций вспомогательных напряжений на 4. Соответственно в формулах (Б.22) — (Б.29) для предыдущего слоя необходимо у функций $\tilde{R}_k(\alpha)$ индекс увеличить на 4, приняв $j = 3$. Для матрицы $\mathrm{A}(\alpha)$ перед двумя последними уравнениями следует вставить блок из четырех уравнений. Координата $z$ для вычисления НДС в слоях должна соответствовать локальной системе координат $z \in (-h_j, 0)$.

# Приложение В (справочное)

# Пример расчёта накопления усталостных повреждений

## В.1 Пример 1 (продвинутый уровень)

Необходимо произвести прогнозирование накопления усталостных повреждений в асфальтобетонных слоях дорожной одежды капитального типа для участка автомобильной дороги I категории.

В.1.1 Исходные данные:

а) область проектирования – Нижегородская;

б) дорожно-климатическая зона – $II_2$;

в) расчётное количество дней в году $T_{рдг}$- 365;

г) тип дорожной одежды – капитальный;

д) расчётный срок службы $T_{сл}$, лет – 24;

е) количество полос движения – 4;

ж) показатель изменения интенсивности движения $q$ = 1,03.

Состав движения на конец нормативного межремонтного срока проведения работ по капитальному ремонту (24-й год эксплуатации дороги) в обоих направлениях приведен в таблице В.1.1.

Таблица В.1.1 - Интенсивности движения

| Схема | Наименование | Интенсивность $N_i$, авт./сут |
|---|---|---|
| | Легковые автомобили, небольшие грузовики (фургоны) и другие автомобили с прицепом и без него | 10 500 |
| | Двухосные грузовые автомобили | 1205 |
| | Трехосные грузовые автомобили | 200 |

| | | |
|---|---|---|
| | Четырехосные грузовые автомобили | 200 |
| | Четырехосные автопоезда | 1000 |
| | Пятиосные автопоезда | 500 |
| | Трехосные седельные автопоезда | 500 |
| | Четырехосные седельные автопоезда | 1000 |
| | Пятиосные седельные автопоезда (двухосный тягач) | 200 |
| | Пятиосные седельные автопоезда (трехосный тягач) | 500 |
| | Шестиосные седельные автопоезда | 200 |
| | Автомобили с семью и более осями | 300 |
| | Автобусы | 300 |
| Итого: $\sum_{m=1}^{n} N_i S_i = 17\,491.80$ ед./сут | | |

Конструкция дорожной одежды приведена в таблице В.1.2. Модули упругости асфальтобетонных слоёв определенные в результате лабораторных испытаний по методике ГОСТ Р 58401.21 (таблица В.1.3). Расчетные модули упругости слоев оснований из не обработанных вяжущими материалов, обработанных вяжущими материалов, оснований и грунтов земляного полотна приняты в соответствии с ГОСТ Р 71404.

Таблица В.1.2 - Характеристики конструктивных слоев дорожной одежды

| № слоя | Наименование материала | Толщина, см | Коэффициент Пуассона | Модуль упругости, МПа |
|---|---|---|---|---|
| 1 | SMA 16 по ГОСТ Р 58401.2 на битумном вяжущем PG 70 - 34 | 5<br>3<*> | 0,35 | Представлены в таблице В.1.3 |
| 2 | SP-22Э по ГОСТ Р 58401.1 на битумном вяжущем PG 64 - 34 | 8 | 0,35 | |
| 3 | SP-32Э по ГОСТ Р 58401.1 на битумном вяжущем PG 64 - 28 | 11 | 0,35 | |
| 4 | ЩПС, укрепленная цементом, М40 по ГОСТ Р 70455 | 14 | 0,35 | 600<**> |
| 5 | Щебень фракции свыше 31,5 до 63 мм изверженных пород М800 по ГОСТ 32703, расклинцованный фракционным мелким щебнем | 28 | 0,25 | 350<**> |
| 6 | Средний песок по ГОСТ 32824 | 21 | 0,25 | 120<**> |
| 7 | Грунт легкая крупная песчанистая супесь | - | 0,25 | 65<*> |
| <*> Толщина ВСП принятая в расчете уменьшена на максимально допустимую глубину колеи в соответствии с ГОСТ Р 50597;<br><**> Расчетные модули упругости в соответствии с ГОСТ Р 71404. | | | | |

Таблица В.1.3 - Результаты лабораторных испытаний по ГОСТ Р 58401.21

| № | Наименование материала | Температура испытания, °С | Частота нагружения, Гц | Динамический модуль упругости, МПа |
|---|---|---|---|---|
| 1 | SMA 16 по ГОСТ Р 58401.2 на битумном вяжущем PG 70 - 34 | +40 | 0,1 | 206 |
| | | | 1 | 322 |
| | | | 10 | 833 |
| | | +20 | 0,1 | 953 |
| | | | 1 | 1804 |
| | | | 10 | 3413 |
| | | 0 | 0,1 | 4436 |
| | | | 1 | 6654 |
| | | | 10 | 9671 |
| 2 | SP-22Э по ГОСТ Р | +40 | 0,1 | 156 |
| | | | 1 | 279 |

| № | Наименование материала | Температура испытания, °С | Частота нагружения, Гц | Динамический модуль упругости, МПа |
|---|---|---|---|---|
| | 58401.1 на битумном вяжущем PG 64 - 34 | | 10 | 567 |
| | | +20 | 0,1 | 565 |
| | | | 1 | 1223 |
| | | | 10 | 2594 |
| | | 0 | 0,1 | 3179 |
| | | | 1 | 5906 |
| | | | 10 | 9529 |
| 3 | SP-32Э по ГОСТ Р 58401.1 на битумном вяжущем PG 64 - 28 | +40 | 0,1 | 1084 |
| | | | 1 | 1906 |
| | | | 10 | 3381 |
| | | +20 | 0,1 | 3395 |
| | | | 1 | 5310 |
| | | | 10 | 7875 |
| | | 0 | 0,1 | 8840 |
| | | | 1 | 11561 |
| | | | 10 | 14486 |

В.1.2 Построение мастер-кривых динамического модуля упругости

Для определения динамических модулей упругости асфальтобетонных слоёв при температурах, отличных от лабораторных, выполняется построение мастер-кривых. Построение выполняется для каждого типа асфальтобетона отдельно по следующему алгоритму.

В.1.2.1 Определение верхнего асимптотического модуля

Для каждого слоя по модели Хирша (формулы 8.6–8.7) вычисляется верхнее асимптотическое значение динамического модуля $E_{max}$. Исходные данные для расчета приведены в таблице В.1.4.

Таблица В.1.4 - Объёмные характеристики асфальтобетонных смесей

| № слоя | Наименование материала | ПМЗ, % | ПНБ, % |
|---|---|---|---|
| 1 | SMA 16 на PG 70-34 | 17,4 | 78,0 |
| 2 | SP-22Э на PG 64-34 | 13,5 | 69,5 |
| 3 | SP-32Э на PG 64-28 | 12,4 | 68,3 |

Пример расчета $E_{max}$ для слоя 1 (SMA 16):

Исходные данные: ПМЗ = 17,4 %, ПНБ = 78,0 %. По формуле (8.7):

$$P_c = \frac{\left(20+\frac{435000+78,0}{17,4}\right)^{0,58}}{650+\left(\frac{435000+78,0}{17,4}\right)^{0,58}} = 0,8725$$

По формуле (8.6):

$$|E^*|_{max} = 0,8725 + \left[42000000\left(1-\frac{17,4}{100}\right) + 435000\left(\frac{78,0 * 17,4}{10000}\right]\right.$$

$$+ \frac{1-P_c}{\left[\frac{\left(1-\frac{17,4}{100}\right)}{42000000} + \frac{17,4}{435000 * 78,0}\right]} = 22464$$

$$\log|E^*|_{max} = 4,35$$

В.1.2.2 По данным таблицы В.1.3 для каждого типа асфальтобетона выполняется подбор параметров мастер-кривой методом наименьших квадратов (в соответствии с п. 8.4.1.5). В процессе оптимизации определяются четыре параметра:

- $\log|E^*|_{min}$- нижнее асимптотическое значение модуля;
- β - параметр формы кривой;
- γ - параметр формы кривой;
- $\Delta E_a$ - энергия активации.

Верхнее асимптотическое значение $\log|E^*|_{max}$ принимается по результатам расчёта по модели Хирша (таблица В.1.4) и в процессе оптимизации не изменяется.

*Примечание — В настоящем примере оптимизация выполнялась с использованием надстройки «Поиск решения» Microsoft Excel.*

Результаты оптимизации для первого слоя приведены в таблице В.1.5.

Таблица В.1.5 - Результаты оптимизации

| Параметр | Слой 1 (SMA 16) |
|---|---|
| $log\|E^*\|_{min}$ | 1,178 |
| $\beta$ | -0,643 |
| $\gamma$ | -0,392 |
| $\Delta E_a$ | 197 041,9 |

В.1.2.3 Расчёт динамического модуля для заданной температуры и частоты

Для каждого месяца и слоя динамический модуль вычисляется по формуле (8.3) с использованием параметров, полученных в результате калибровки (раздел В.1.2.2), при частоте ω=10$\omega$=10 Гц.

Пример для слоя 1 в январе:

Температура воздуха в январе $T_в$=−8°C.

Средняя температура расчётной толщины слоя 1 по формуле (8.2) при h=1,5 мм (середина расчётной толщины 3 см):

$$T_h = 5.7 \cdot \ln(0{,}01 \cdot 15 + 1{,}0) + (-8) = -7{,}2^\circ C$$

Перевод в Кельвины: T=−7,2+273,15=265,95 K.

Приведённая частота (формула 8.4) при ω=10$\omega$=10 Гц:

$$\log \omega_r = \log(10) + \frac{197042}{19{,}14714} \cdot \left(\frac{1}{265{,}95} - \frac{1}{293{,}15}\right) = 4.592$$

Подставляем в формулу (8.3) с параметрами слоя 1:

$$\log|E^*| = 1{,}178 + \frac{4{,}35 - 1{,}178}{1 + e^{-0{,}643 + (-0{,}392)\cdot 4{,}592}} = 4{,}097$$

$$E^* = 12\,507 \text{ МПа}$$

Аналогичным способом для всех слоев получены динамические модули упругости

Таблица В.1.6 — Динамические модули упругости асфальтобетонных слоёв, МПа

| Месяц | 1 слой (верхний) | | 2 слой | | 3 слой | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $t_{ср}$ | $E_{а\б}$, МПа | $t_{ср}$ | $E_{а\б}$, МПа | $t_{ср}$ | $E_{а\б}$, МПа |
| Январь | -7.2 | 12507 | -6.1 | 12261 | -5.5 | 15717 |
| Февраль | -5.3 | 11772 | -4.4 | 11470 | -3.9 | 15232 |
| Март | 1.3 | 9194 | 1.7 | 8668 | 1.9 | 13417 |
| Апрель | 10.0 | 6055 | 10.0 | 5342 | 10.0 | 10850 |
| Май | 15.0 | 4545 | 15.1 | 3765 | 15.1 | 9297 |
| Июнь | 21.9 | 2912 | 21.9 | 2260 | 21.8 | 7350 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Июль | 24.8 | 2381 | 24.5 | 1845 | 24.3 | 6660 |
| Август | 23.8 | 2555 | 23.6 | 1980 | 23.5 | 6895 |
| Сентябрь | 16.0 | 4275 | 16.1 | 3502 | 16.1 | 9000 |
| Октябрь | 9.0 | 6387 | 9.1 | 5660 | 9.1 | 11128 |
| Ноябрь | 1.3 | 9194 | 1.7 | 8668 | 1.9 | 13417 |
| Декабрь | -6.3 | 12160 | -5.2 | 11843 | -4.7 | 15462 |

В.1.3 Данные о температурном и влажностном режимах — приведены в таблице В.1.7.

Таблица В.1.7 — Температура, влажность грунта и распределение годовой интенсивности по месяцам

| Месяц | Температура, °С | Относительная влажность грунта, % | Интенсивность, % |
|---|---|---|---|
| Январь | -8 | 0,7 | 8,33 |
| Февраль | -6 | 0,7 | 8,33 |
| Март | 1 | 0,7 | 8,33 |
| Апрель | 10 | 0,7 | 8,33 |
| Май | 15 | 0,7 | 8,33 |
| Июнь | 22 | 0,7 | 8,33 |
| Июль | 25 | 0,6 | 8,33 |
| Август | 24 | 0,6 | 8,33 |
| Сентябрь | 16 | 0,7 | 8,33 |
| Октябрь | 9 | 0,8 | 8,33 |
| Ноябрь | 1 | 0,8 | 8,33 |
| Декабрь | -7 | 0,8 | 8,37 |

В.1.3.1 Среднемесячные значения модуля упругости грунта приведены в таблице В.1.8.

Таблица В.1.8 — Динамические модули упругости асфальтобетонных слоёв, МПа

| Месяц | Грунт | |
|---|---|---|
| | относительная влажность грунта, % | $E_{грунта}$, МПа |
| Январь | 70 | 65 |
| Февраль | 70 | 65 |
| Март | 70 | 65 |
| Апрель | 70 | 65 |
| Май | 70 | 65 |
| Июнь | 70 | 65 |
| Июль | 60 | 65 |
| Август | 60 | 65 |
| Сентябрь | 70 | 65 |
| Октябрь | 80 | 65 |
| Ноябрь | 80 | 65 |
| Декабрь | 80 | 65 |

В.1.4 Определение суммарного количество приложений приведенной расчетной нагрузки $\sum N_{\text{р}}$ за нормативный срок службы.

$$\sum N_p = 0.7 \cdot 0.45 \cdot 17\,491.80 \cdot \frac{34.43}{1.03^{(24-1)}} \cdot 365 \cdot 1.62 = 56\,831\,519$$

В.1.5 Расчёт напряжённо-деформированного состояния

В.1.5.1 Для каждого месяца выполняется расчёт НДС многослойной конструкции по методике раздела 10 с использованием соответствующих модулей упругости слоёв. Определяется относительная деформация растяжения $\varepsilon_i$ на нижней границе пакета асфальтобетонных слоёв.

Таблица В.1.9 — Относительная деформации растяжения на нижней границе пакета

| Месяц | $\varepsilon_i$ |
|---|---|
| Январь | 0.000066 |
| Февраль | 0.000068 |
| Март | 0.000074 |
| Апрель | 0.000089 |
| Май | 0.000102 |
| Июнь | 0.000120 |
| Июль | 0.000131 |
| Август | 0.000127 |
| Сентябрь | 0.000105 |
| Октябрь | 0.000087 |
| Ноябрь | 0.000074 |
| Декабрь | 0.000067 |

В.1.6 Расчёт допустимого числа приложений нагрузки

В.1.6.1 Для продвинутого уровня расчёта коэффициенты $K_1$, $K_2$, $K_3$ определены индивидуально для конкретного типа асфальтобетона на основе результатов лабораторных испытаний на усталость ГОСТ Р 59280-2020, построения корреляционной зависимости между логарифмом относительной начальной деформации и логарифмом количества циклов нагружения и последующей калибровки по данным натурных наблюдений в соответствии с разделом 13.

$K_1 = 1.200$ , $K_2 = -3.220$, $K_3 = -0.995$

В.1.6.2 Для каждого месяца по формуле (11.3) рассчитывается допустимое число приложений нагрузки $Nf_i$:

Таблица В.1.10 — Допустимое число приложений нагрузки за месяц

| Месяц | $\Sigma N_{pi}$ | $N_{fi}$ | $D_i(t) = \Sigma N_{pi} / N_{fi}$ |
|---|---|---|---|

| Месяц | $\Sigma N_{pi}$ | $N_{fi}$ | $D_i(t) = \Sigma N_{pi} / N_{fi}$ |
|---|---|---|---|
| Январь | 137512 | 7568787 | 0.018168 |
| Февраль | 137512 | 7143532 | 0.019250 |
| Март | 137512 | 6136829 | 0.022408 |
| Апрель | 137512 | 4346700 | 0.031636 |
| Май | 137512 | 3542126 | 0.038822 |
| Июнь | 137512 | 2712981 | 0.050687 |
| Июль | 137512 | 2391890 | 0.057491 |
| Август | 137512 | 2498638 | 0.055035 |
| Сентябрь | 137512 | 3382841 | 0.040650 |
| Октябрь | 137512 | 4546288 | 0.030247 |
| Ноябрь | 137512 | 6136829 | 0.022408 |
| Декабрь | 138173 | 7355490 | 0.018785 |
| Суммарно: | | $D(t=1) =$ | 0.40559 |

*Примечание — $\Sigma Np_i$ в первый год эксплуатации определено с учётом интенсивности движения и внутригодового распределения по месяцам.*

В.1.7 Расчёт накопления повреждений за срок службы

В.1.7.1 Помесячные доли повреждений суммируются по формуле (11.5). Накопление по годам приведено в таблице В.1.11.

Таблица В.1.11 — Накопление повреждений по годам

| Год | $D(t)$ | Год | $D(t)$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.40559 | 13 | 6.33437 |
| 2 | 0.82334 | 14 | 6.92999 |
| 3 | 1.25363 | 15 | 7.54347 |
| 4 | 1.69682 | 16 | 8.17536 |
| 5 | 2.15331 | 17 | 8.82621 |
| 6 | 2.62350 | 18 | 9.49658 |
| 7 | 3.10779 | 19 | 10.18707 |

| Год | $D(t)$ | Год | $D(t)$ |
|---|---|---|---|
| 8 | 3.60661 | 20 | 10.89827 |
| 9 | 4.12040 | 21 | 11.63080 |
| 10 | 4.64960 | 22 | 12.38531 |
| 11 | 5.19467 | 23 | 13.16246 |
| 12 | 5.75610 | 24 | 13.96292 |

В.1.7.2 Общая доля накопленных повреждений за весь срок службы $D$ = 13.96292.

В.1.7.3 Для определения фактического состояния покрытия пересчитываем $D$ в площадь сетки трещин S по формуле (12.1), таблица В.1.12.

Таблица В.1.12— Соотношение между долей накопленных повреждений и площадью сетки усталостных трещин

| Год | *D(t)* | *lg(D)* | *S, %* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.40559 | -0.4 | 0.3 |
| 2 | 0.82334 | -0.1 | 0.6 |
| 3 | 1.25363 | 0.1 | 1.0 |
| 4 | 1.69682 | 0.2 | 1.4 |
| 5 | 2.15331 | 0.3 | 1.7 |
| 6 | 2.6235 | 0.4 | 2.1 |
| 7 | 3.10779 | 0.5 | 2.5 |
| 8 | 3.60661 | 0.6 | 2.9 |
| 9 | 4.1204 | 0.6 | 3.4 |
| 10 | 4.6496 | 0.7 | 3.8 |
| 11 | 5.19467 | 0.7 | 4.3 |
| 12 | 5.7561 | 0.8 | 4.7 |
| 13 | 6.33437 | 0.8 | 5.2 |
| 14 | 6.92999 | 0.8 | 5.7 |
| 15 | 7.54347 | 0.9 | 6.2 |
| 16 | 8.17536 | 0.9 | 6.7 |
| 17 | 8.82621 | 0.9 | 7.2 |
| 18 | 9.49658 | 1.0 | 7.7 |
| 19 | 10.18707 | 1.0 | 8.3 |
| 20 | 10.89827 | 1.0 | 8.8 |
| 21 | 11.6308 | 1.1 | 9.4 |
| **22** | **12.38531** | **1.1** | **10.0** |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 23 | 13.16246 | 1.1 | 10.6 |
| 24 | 13.96292 | 1.1 | 11.2 |

В.1.8 Проверка критерия

В.1.8.1 Для дороги I категории $S_{пред}$ = 10 % (по таблице 12.1).

В.1.8.2 Расчёт показал, что исходная конструкция дорожной не обеспечивает требуемой долговечности: предельное значение площади сетки усталостных трещин $S_{пред}$= 10 % для дорог I категории достигается на 22-м году эксплуатации, что на 2 года меньше нормативного срока службы. Таким образом, конструкция не удовлетворяет критерию сопротивления усталостному разрушению, установленному в разделе 12.

В.1.9 Для обеспечения требуемого срока службы необходимо усиление дорожной одежды. Ниже рассмотрен вариант усиления за счёт увеличения толщины слоя основания из ЩПС, укреплённой цементом, с 14 до 20 см.

В.1.10 Расчёт усиленной конструкции

Для усиленной конструкции приняты следующие изменения:

- слой № 4 (ЩПС, укреплённая цементом, М40) — толщина увеличена с 14 до 20 см;
- все остальные слои и их характеристики оставлены без изменений (см. таблицу В.1.2).

В.1.10.1 Для усиленной конструкции выполнен повторный расчёт по методике раздела 10. Относительные деформации растяжения на нижней границе пакета асфальтобетонных слоёв приведены в таблице В.1.13.

Таблица В.1.13 — Относительная деформации растяжения на нижней границе пакета асфальтобетонных слоёв

| Месяц | $\varepsilon_i$ |
|---|---|
| Январь | 0.000064 |
| Февраль | 0.000066 |
| Март | 0.000071 |
| Апрель | 0.000086 |

| Месяц | $\varepsilon_i$ |
|---|---|
| Май | 0.000098 |
| Июнь | 0.000116 |
| Июль | 0.000126 |
| Август | 0.000123 |
| Сентябрь | 0.000101 |
| Октябрь | 0.000084 |
| Ноябрь | 0.000071 |
| Декабрь | 0.000065 |

В.1.10.2 Расчёт допустимого числа приложений нагрузки

Для каждого месяца по формуле (11.3) с теми же коэффициентами ($K_1$ = 1,200, $K_2$ = –3,220, $K_3$ = –0,995) рассчитано допустимое число приложений нагрузки $N_{fi}$. Результаты приведены в таблице В.1.14.

Таблица В.1.14 — Допустимое число приложений нагрузки за месяц

| Месяц | $\Sigma N_{pi}$ | $N_{fi}$ | $D_i(t) = \Sigma N_{pi} / N_{fi}$ |
|---|---|---|---|
| Январь | 137512 | 8405357 | 0.016360 |
| Февраль | 137512 | 7941995 | 0.017315 |
| Март | 137512 | 6843347 | 0.020094 |
| Апрель | 137512 | 4879273 | 0.028183 |
| Май | 137512 | 3991504 | 0.034451 |
| Июнь | 137512 | 3071779 | 0.044766 |
| Июль | 137512 | 2712563 | 0.050695 |
| Август | 137512 | 2832206 | 0.048553 |
| Сентябрь | 137512 | 3815664 | 0.036039 |
| Октябрь | 137512 | 5099420 | 0.026966 |
| Ноябрь | 137512 | 6843347 | 0.020094 |
| Декабрь | 138173 | 8173034 | 0.016906 |

| Месяц | $\Sigma N_{pi}$ | $N_{fi}$ | $D_i(t) = \Sigma N_{pi} / N_{fi}$ |
|---|---|---|---|
| Суммарно: | | $D(t=1) =$ | 0.36042 |

В.1.10.3 Помесячные доли повреждений суммируются по формуле (11.5). Накопление по годам приведено в таблице В.1.15.

Таблица В.1.15 — Накопление повреждений по годам

| Год | $D(t)$ | Год | $D(t)$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.36042 | 13 | 5.62901 |
| 2 | 0.73166 | 14 | 6.15830 |
| 3 | 1.11403 | 15 | 6.70347 |
| 4 | 1.50787 | 16 | 7.26500 |
| 5 | 1.91353 | 17 | 7.84337 |
| 6 | 2.33136 | 18 | 8.43909 |
| 7 | 2.76173 | 19 | 9.05269 |
| 8 | 3.20500 | 20 | 9.68469 |
| 9 | 3.66157 | 21 | 10.33566 |
| 10 | 4.13184 | 22 | 11.00615 |
| 11 | 4.61622 | 23 | 11.69676 |
| 12 | 5.11513 | 24 | 12.40808 |

В.1.10.4 Общая доля накопленных повреждений за весь срок службы $D$ = 12.40808.

В.1.10.5 Для определения фактического состояния покрытия пересчитываем $D$ в площадь сетки трещин S по формуле (12.1), таблица В.1.16.

Таблица В.1.16 — Соотношение между долей накопленных повреждений и площадью сетки усталостных трещин

| Год | *D(t)* | *lg(D)* | *S, %* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.36042 | -0.4 | 0.3 |
| 2 | 0.73166 | -0.1 | 0.6 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 3 | 1.11403 | 0.0 | 0.9 |
| 4 | 1.50787 | 0.2 | 1.2 |
| 5 | 1.91353 | 0.3 | 1.5 |
| 6 | 2.33136 | 0.4 | 1.9 |
| 7 | 2.76173 | 0.4 | 2.2 |
| 8 | 3.205 | 0.5 | 2.6 |
| 9 | 3.66157 | 0.6 | 3.0 |
| 10 | 4.13184 | 0.6 | 3.4 |
| 11 | 4.61622 | 0.7 | 3.8 |
| 12 | 5.11513 | 0.7 | 4.2 |
| 13 | 5.62901 | 0.8 | 4.6 |
| 14 | 6.1583 | 0.8 | 5.1 |
| 15 | 6.70347 | 0.8 | 5.5 |
| 16 | 7.265 | 0.9 | 6.0 |
| 17 | 7.84337 | 0.9 | 6.4 |
| 18 | 8.43909 | 0.9 | 6.9 |
| 19 | 9.05269 | 1.0 | 7.4 |
| 20 | 9.68469 | 1.0 | 7.9 |
| 21 | 10.33566 | 1.0 | 8.4 |
| 22 | 11.00615 | 1.0 | 8.9 |
| 23 | 11.69676 | 1.1 | 9.5 |
| **24** | **12.40808** | **1.1** | **10.0** |

В.1.11 Проверка критерия

В.1.11.1 Для дороги I категории $S_{пред}$ = 10 % (по таблице 12.1).

В.1.11.2 На конец расчётного срока службы (24 года) расчётная площадь сетки усталостных трещин составляет 10%. Условие выполняется.

В.1.11.3 Увеличение толщины слоя ЩПС, укреплённой цементом, с 14 до 20 см позволяет обеспечить сопротивление усталостному разрушению в течение всего нормативного срока службы. Дорожная одежда удовлетворяет критерию расчёта по усталостному разрушению.

**В.2 Пример 2 (стандартный уровень)**

Необходимо произвести прогнозирование накопления усталостных повреждений в асфальтобетонных слоях дорожной одежды капитального типа для участка автомобильной дороги III категории.

В.2.1 Исходные данные:

а) область проектирования – Курская;

б) дорожно-климатическая зона – $III_2$;

в) расчётное количество дней в году $T_{рдг}$- 365;

г) тип дорожной одежды – капитальный;

д) расчётный срок службы $T_{сл}$, лет – 24;

е) количество полос движения – 2;

ж) показатель изменения интенсивности движения $q$ = 1,03;

Состав движения на конец нормативного межремонтного срока проведения работ по капитальному ремонту (24-й год эксплуатации дороги) в обоих направлениях приведен в таблице В.2.1.

Таблица В.2.1 - Интенсивности движения

| Схема | Наименование | Интенсивность $N_i$, авт./сут |
|---|---|---|
| | Легковые автомобили, небольшие грузовики (фургоны) и другие автомобили с прицепом и без него | 2100 |
| | Двухосные грузовые автомобили | 100 |
| | Трехосные грузовые автомобили | 50 |
| | Четырехосные грузовые автомобили | 40 |

| | | |
|---|---|---|
| | Четырехосные автопоезда | 30 |
| | Пятиосные автопоезда | 20 |
| | Трехосные седельные автопоезда | 20 |
| | Четырехосные седельные автопоезда | 40 |
| | Пятиосные седельные автопоезда (двухосный тягач) | 100 |
| | Пятиосные седельные автопоезда (трехосный тягач) | 20 |
| | Шестиосные седельные автопоезда | 30 |
| | Автомобили с семью и более осями | 5 |
| | Автобусы | 50 |
| Итого: $\sum_{m=1}^{n} N_i S_i = 1\,466.20$ ед./сут | | |

Конструкция дорожной одежды приведена в таблице В.2.3. Расчетные модули упругости асфальтобетонных слоёв приняты на основании данных таблиц Г.4 и Г.5 ГОСТ Р 71404-2024, модули упругости слоев оснований из не обработанных вяжущими материалов, обработанных вяжущими материалов, оснований и грунтов земляного полотна приняты в соответствии с ГОСТ Р 71404.

В.2.3 Для определения модулей упругости асфальтобетонных слоев при температурах ниже 0°С на основе данных таблиц Г.4 и Г.5 ГОСТ Р 71404-

2024 (таблица В.2.2) построена полиномиальная аппроксимация второго порядка, для ЩМА-16 формула В.2.1 для А22Нт – В.2.2, для А32От – В.2.3.

Таблица В.2.2 – Расчетные модули упругости асфальтобетонных слоев в соответствии с ГОСТ Р 71404

| Материал | Расчетный модуль упругости *E*, МПа при температуре, °С | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| ЩМА-16 по ГОСТ Р 58406.1 на ПБВ 60 по ГОСТ Р 52056 | 5300 | 3550 | 2300 | 1200 | 550 | 400 |
| А22Нт по ГОСТ Р 58406.2 на БНД 50/70 по ГОСТ 33133 | 7200 | 4800 | 3350 | 1850 | 900 | 600 |
| А32От по ГОСТ Р 58406.2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133 | 5450 | 3250 | 2100 | 1250 | 550 | 450 |

$$y = 1.8571 \cdot x^2 - 191.71 \cdot x + 5307.1 \quad R_2=0.999 \qquad (В.2.1)$$

$$y = 2.2321 \cdot x^2 - 243.61 \cdot x + 7160.7 \quad R_2=0.998 \qquad (В.2.2)$$

$$y = 2.1964 \cdot x^2 - 206.82 \cdot x + 5332.1 \quad R_2=0.995 \qquad (В.2.3)$$

где, у – расчетный модуль упругости, при искомой температуре х.

Таблица В.2.3 - Характеристики конструктивных слоев дорожной одежды

| № слоя | Наименование материала | Толщина, см | Коэффициент Пуассона | Расчетный модуль упругости, МПа при температуре, °С | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ЩМА-16 по ГОСТ Р 58406.1 на ПБВ 60 по ГОСТ Р 52056 | 5 | 0,35 | +40 | 550 |
| | | | | +30 | 1200 |
| | | | | +20 | 2300 |
| | | | | +10 | 3550 |
| | | | | 0 | 5300 |
| | | | | -10 | 7410 |
| | | | | -20 | 9884 |
| | А22$Н_т$ по ГОСТ Р 58406.2 на БНД 50/70 по ГОСТ 33133 | 7 | 0,35 | +40 | 900 |
| | | | | +30 | 1850 |
| | | | | +20 | 3350 |
| | | | | +10 | 4800 |
| | | | | 0 | 7200 |
| | | | | -10 | 9819 |
| | | | | -20 | 12925 |
| | А32$О_т$ по ГОСТ Р | 10 | 0,35 | +40 | 550 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 58406.2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133 | | | +30 | 1250 |
| | | | | +20 | 2100 |
| | | | | +10 | 3250 |
| | | | | 0 | 5450 |
| | | | | -10 | 7620 |
| | | | | -20 | 10347 |
| | Щебень шлаковый активный фракции свыше 31,5 до 63 мм, М400 по ГОСТ 32826, уложенный по способу заклинки активным шлаком | 37 | 0,25 | 400 | |
| | Средний песок по ГОСТ 32824 | 35 | 0,25 | 120 | |
| | Верхняя часть рабочего слоя: пылеватая супесь, укрепленная неорганическими вяжущими совместно с органическими, М10 по ГОСТ Р 70452 | 20 | 0,25 | 150 | |
| | Грунт рабочего слоя - пылеватая супесь | - | 0,25 | 46 | |

В.2.4 Определение суммарного количество приложений приведенной расчетной нагрузки $\sum N_{\text{р}}$ за нормативный срок службы.

$$\sum N_p = 0.7 \cdot 0.55 \cdot 1\,466{,}20 \cdot \frac{34.43}{1.03^{(24-1)}} \cdot 365 \cdot 1.42 = 5\,103\,540 \qquad \text{(В.2.4)}$$

В.2.5 Данные о температурном и влажностном режимах — приведены в таблице В.2.4.

Таблица В.2.4 — Среднемесячные температура, влажность и интенсивность

| Месяц | Температура, °С | Относительная влажность грунта, % | Интенсивность, % |
|---|---|---|---|

| Месяц | Температура, °С | Относительная влажность грунта, % | Интенсивность, % |
|---|---|---|---|
| Январь | -4 | 70 | 8,33 |
| Февраль | -2 | 70 | 8,33 |
| Март | 3 | 70 | 8,33 |
| Апрель | 12 | 70 | 8,33 |
| Май | 17 | 70 | 8,33 |
| Июнь | 22 | 70 | 8,33 |
| Июль | 25 | 80 | 8,33 |
| Август | 26 | 80 | 8,33 |
| Сентябрь | 19 | 90 | 8,33 |
| Октябрь | 11 | 90 | 8,33 |
| Ноябрь | 3 | 80 | 8,33 |
| Декабрь | -1 | 70 | 8,37 |

В.2.6 Расчёт температурного режима и динамических модулей упругости

В.2.6.1 Для каждого месяца по формуле (8.1) определяется температура покрытия, а по формуле (8.2) — изменение температуры по глубине слоёв.

В.2.6.2 На основе средних по толщине значений температуры слоя определяются модули упругости для каждого асфальтобетонного слоя. Результаты приведены в таблице В.2.5.

Таблица В.2.5 — Модули упругости асфальтобетонных слоёв, МПа

| Месяц | 1 слой (верхний) | | 2 слой | | 3 слой | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $t_{ср}$ | $E_{а\б}$, МПа | $t_{ср}$ | $E_{а\б}$, МПа | $t_{ср}$ | $E_{а\б}$, МПа |
| Январь | -3.5 | 7773 | -2.5 | 9274 | -2.1 | 6852 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Февраль | -1.5 | 6343 | -0.5 | 7599 | -0.1 | 5485 |
| Март | 3.2 | 4748 | 3.4 | 6378 | 3.5 | 4670 |
| Апрель | 12.1 | 3065 | 12.2 | 4025 | 12.2 | 2803 |
| Май | 17.1 | 1885 | 17.2 | 2228 | 17.3 | 1788 |
| Июнь | 21.7 | 1108 | 21.0 | 1227 | 20.8 | 1204 |
| Июль | 24.7 | 942 | 24.0 | 1160 | 23.8 | 1020 |
| Август | 25.1 | 915 | 23.6 | 1170 | 22.9 | 1073 |
| Сентябрь | 19.1 | 1415 | 19.2 | 1518 | 19.3 | 1388 |
| Октябрь | 11.1 | 3300 | 11.2 | 4380 | 11.2 | 3003 |
| Ноябрь | 3.2 | 4748 | 3.4 | 6378 | 3.5 | 4670 |
| Декабрь | -0.5 | 5628 | 0.5 | 7075 | 0.9 | 5241 |

В.2.6.3 Среднемесячные значения модуля упругости грунта приведены в таблице В.2.6.

Таблица В.2.6 — Модуль грунта земляного полотна, МПа

| Месяц | Грунт | |
|---|---|---|
| | Относительная влажность грунта, % | $E_{грунта}$, МПа |
| Январь | 70 | 46 |
| Февраль | 70 | 46 |
| Март | 70 | 46 |
| Апрель | 70 | 46 |
| Май | 70 | 46 |
| Июнь | 70 | 46 |
| Июль | 80 | 32 |
| Август | 80 | 32 |
| Сентябрь | 90 | 26 |
| Октябрь | 90 | 26 |
| Ноябрь | 80 | 32 |
| Декабрь | 70 | 46 |

В.2.7 Расчёт напряжённо-деформированного состояния

В.2.7.1 Для каждого месяца выполняется расчёт НДС многослойной конструкции по методике раздела 10 с использованием соответствующих модулей упругости слоёв. Определяется относительная деформация растяжения $\varepsilon_i$ на нижней границе пакета асфальтобетонных слоёв.

Таблица В.2.7 — Относительная деформации растяжения на нижней границе пакета

| Месяц | $\varepsilon_i$ |
|---|---|
| Январь | 0.000107 |
| Февраль | 0.000122 |
| Март | 0.000134 |
| Апрель | 0.000171 |
| Май | 0.000205 |
| Июнь | 0.000232 |
| Июль | 0.000238 |
| Август | 0.000236 |
| Сентябрь | 0.000222 |
| Октябрь | 0.000166 |
| Ноябрь | 0.000135 |
| Декабрь | 0.000126 |

В.2.8 Расчёт допустимого числа приложений нагрузки

В.2.8.1 Для стандартного уровня расчёта $K_1 = 1.200$ , $K_2 = -3.220$, $K_3 = -0.995$.

В.2.8.2 Для каждого месяца по формуле (11.3) рассчитывается допустимое число приложений нагрузки $Nf_i$:

Таблица В.2.8 — Допустимое число приложений нагрузки за месяц

| Месяц | $\Sigma N_{pi}$ | $N_{fi}$ | $D_i(t) = \Sigma N_{pi} / N_{fi}$ |
|---|---|---|---|
| Январь | 12582 | 3423516 | 0.003675 |

| Месяц | $\Sigma N_{pi}$ | $N_{fi}$ | $D_i(t) = \Sigma N_{pi} / N_{fi}$ |
|---|---|---|---|
| Февраль | 12582 | 2860042 | 0.004399 |
| Март | 12582 | 2439788 | 0.005157 |
| Апрель | 12582 | 1871188 | 0.006724 |
| Май | 12582 | 1618449 | 0.007774 |
| Июнь | 12582 | 1616982 | 0.007781 |
| Июль | 12582 | 1763621 | 0.007134 |
| Август | 12582 | 1712064 | 0.007349 |
| Сентябрь | 12582 | 1613591 | 0.007798 |
| Октябрь | 12582 | 1892503 | 0.006648 |
| Ноябрь | 12582 | 2383268 | 0.005279 |
| Декабрь | 12643 | 2690021 | 0.004700 |
| Суммарно: | | $D(t=1) =$ | 0.07442 |

*Примечание — $\Sigma Np_i$ в первый год эксплуатации определено с учётом интенсивности движения и внутригодового распределения по месяцам.*

В.2.9 Расчёт накопления повреждений за срок службы

В.2.9.1 Помесячные доли повреждений суммируются по формуле (11.5). Накопление по годам приведено в таблице В.2.9.

Таблица В.2.9 — Накопление повреждений по годам

| Год | $D(t)$ | Год | $D(t)$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.07442 | 13 | 1.16227 |
| 2 | 0.15107 | 14 | 1.27156 |
| 3 | 0.23002 | 15 | 1.38413 |
| 4 | 0.31135 | 16 | 1.50007 |
| 5 | 0.39511 | 17 | 1.61950 |
| 6 | 0.48138 | 18 | 1.74250 |
| 7 | 0.57024 | 19 | 1.86920 |
| 8 | 0.66177 | 20 | 1.99969 |

| Год | *D(t)* | Год | *D(t)* |
|---|---|---|---|
| 9 | 0.75604 | 21 | 2.13410 |
| 10 | 0.85314 | 22 | 2.27255 |
| 11 | 0.95316 | 23 | 2.41514 |
| 12 | 1.05617 | 24 | 2.56202 |

В.2.9.2 Общая доля накопленных повреждений за весь срок службы $D$ = 7.22134.

В.2.9.3 Для определения фактического состояния покрытия пересчитываем $D$ в площадь сетки трещин S по формуле (12.1), таблица В.2.10.

Таблица В.2.10 — Соотношение между долей накопленных повреждений и площадью сетки усталостных трещин

| Год | *D(t)* | *lg(D)* | *S, %* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.07442 | -1.1 | 0.1 |
| 2 | 0.15107 | -0.8 | 0.1 |
| 3 | 0.23002 | -0.6 | 0.2 |
| 4 | 0.31135 | -0.5 | 0.2 |
| 5 | 0.39511 | -0.4 | 0.3 |
| 6 | 0.48138 | -0.3 | 0.4 |
| 7 | 0.57024 | -0.2 | 0.4 |
| 8 | 0.66177 | -0.2 | 0.5 |
| 9 | 0.75604 | -0.1 | 0.6 |
| 10 | 0.85314 | -0.1 | 0.7 |
| 11 | 0.95316 | 0.0 | 0.7 |
| 12 | 1.05617 | 0.0 | 0.8 |
| 13 | 1.16227 | 0.1 | 0.9 |
| 14 | 1.27156 | 0.1 | 1.0 |
| 15 | 1.38413 | 0.1 | 1.1 |
| 16 | 1.50007 | 0.2 | 1.2 |
| 17 | 1.6195 | 0.2 | 1.3 |
| 18 | 1.7425 | 0.2 | 1.4 |
| 19 | 1.8692 | 0.3 | 1.5 |
| 20 | 1.99969 | 0.3 | 1.6 |
| 21 | 2.1341 | 0.3 | 1.7 |
| 22 | 2.27255 | 0.4 | 1.8 |
| 23 | 2.41514 | 0.4 | 1.9 |
| 24 | 2.56202 | 0.4 | 2.1 |

В.2.10 Проверка критерия

В.2.10.1 Для дороги III категории $S_{пред}$ = 20 % (по таблице 12.1).

В.2.10.2 Допустимое значение $S_{пред}$ не будет достигнуто за расчетный срок службы.

Вывод: конструкция дорожной одежды удовлетворяет критерию сопротивления усталостному разрушению за весь расчётный срок службы.

Исполнители:

АНО «НИИ ТСК»
Заместитель
генерального директора
канд. техн. наук — подпись — К.А. Жданов

Руководитель отдела
проектного и технического
развития — подпись — М.Ю. Горский

Руководитель лаборатории
асфальтобетонных смесей и
асфальтобетонов
канд. техн. наук — подпись — Г.Ф. Кадыров

Соисполнители:

ООО «АКАДЕМДОРСЕРВИС»
Генеральный директор — подпись — В.В. Акулов

Главный инженер
д-р. техн. наук, проф. — подпись — Е.В. Углова

Ведущий инженер
д-р. техн. наук, проф. — подпись — А.Н. Тиратурян