ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 59918— 2021

Дороги автомобильные общего пользования

НЕЖЕСТКИЕ ДОРОЖНЫЕ ОДЕЖДЫ

Методики оценки прочности

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2022

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

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

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 418 «Дорожное хозяйство»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 декабря 2021 г. № 1667-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2022

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 2
4 Обозначения и сокращения 2
5 Общие положения 2
6 Методика оценки прочности дорожной одежды по общему модулю упругости 3
7 Методика оценки прочности конструктивных слоев дорожной одежды и рабочего слоя земляного полотна 7
Приложение А (рекомендуемое) Методики корректировки прогибов по температуре и корректировки модуля упругости с учетом влажности грунта рабочего слоя земляного полотна 14
Приложение Б (справочное) Выполнение измерений в зависимости от цели проведения работ 20
Приложение В (обязательное) Основные уравнения математической модели для определения модулей упругости отдельных конструктивных слоев 23
Приложение Г (справочное) Примеры оценки прочности дорожной одежды и модулей упругости отдельных конструктивных слоев 33
Приложение Д (справочное) Тестовые примеры для валидации и отладки программных комплексов 43
Приложение Е (справочное) Форма таблицы с сопоставлением проектных и фактических модулей упругости 48
Библиография 49

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Дороги автомобильные общего пользования

НЕЖЕСТКИЕ ДОРОЖНЫЕ ОДЕЖДЫ

Методики оценки прочности

Automobile roads of general use. Flexible pavement. Methods for determining the strength

Дата введения — 2022—02—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на нежесткие дорожные одежды (далее — дорожная одежда) автомобильных дорог общего пользования.

Настоящий стандарт устанавливает методики оценки прочности на основе определения общего модуля упругости дорожной одежды и определения модулей упругости конструктивных слоев дорожной одежды, а также грунта рабочего слоя земляного полотна с использованием установок динамического нагружения.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 5180 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик

ГОСТ 32729 Дороги автомобильные общего пользования. Метод измерения упругого прогиба нежестких дорожных одежд для определения прочности

ГОСТ 33063 Дороги автомобильные общего пользования. Классификация типов местности и грунтов

ГОСТ 33388 Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению диагностики и паспортизации

ГОСТ Р 58349 Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Методы измерения толщины слоев дорожной одежды

ГОСТ Р 59120 Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Общие требования

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, 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 отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

Издание официальное

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 32729, ГОСТ 33388, ГОСТ Р 58349 и ГОСТ Р 59120, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **расчетная чаша динамических прогибов:** Чаша прогиба, рассчитываемая на основе моделей динамического напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций.

3.2 **фактическая чаша динамических прогибов:** Чаша прогиба, определяемая по результатам измерений на автомобильной дороге.

4 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте использованы следующие обозначения и сокращения:

$l^{д}_{T=10}$	—	значение динамического прогиба при расчетной температуре 10 °С;
$l^{ст}_{T=10}$	—	значение статического прогиба при расчетной температуре 10 °С;
p	—	удельное давление нагрузочной плиты в зоне контакта с покрытием;
F	—	нагрузка на дорожное покрытие;
S	—	площадь нагрузочной плиты в зоне контакта с покрытием;
d	—	измеритель прогиба;
D	—	диаметр нагрузочной плиты;
u_z	—	перемещение точки в вертикальном направлении;
u_R	—	перемещение точки в радиальном направлении;
u_k	—	максимум модуля перемещений во времени (максимальный динамический прогиб);
σ_z	—	нормальные напряжения на горизонтальных площадках;
τ_{ZR}	—	касательные напряжения на горизонтальных площадках;
max $u_z(R)$	—	упругие прогибы, зарегистрированные в точках установки измерителей прогиба;
R	—	расстояние от точки приложения нагрузки;
t	—	время;
$T_ф$	—	фактическая температура асфальтобетона при выполнении измерений;
ρ	—	плотность среды;
E	—	модуль упругости;
$E_ф$	—	фактический модуль упругости;
ν	—	коэффициент Пуассона;
λ, μ	—	коэффициенты Ламе;
ω	—	круговая частота колебаний;
$K_{пр}$	—	коэффициент прочности дорожной одежды;
$Б_{ср}$	—	балл оценки повреждений дорожного покрытия;
НДС	—	напряженно-деформированное состояние;
УДН	—	установка динамического нагружения.

5 Общие положения

5.1 Настоящий стандарт включает в себя:

- методику оценки прочности дорожной одежды по общему модулю упругости;
- методику оценки прочности отдельных конструктивных слоев дорожной одежды и рабочего слоя земляного полотна.

Методику оценки прочности дорожной одежды по общему модулю упругости применяют на дорожных одеждах в соответствии с классификацией по ГОСТ Р 59120 (кроме низшего типа) на покрытиях из всех типов материалов.

Методику оценки прочности отдельных конструктивных слоев дорожной одежды и рабочего слоя земляного полотна применяют только на дорожных одеждах в соответствии с классификацией по ГОСТ Р 59120 с покрытием из асфальтобетона и минеральных материалов, укрепленных органическими или комплексными вяжущими.

5.2 Оценка прочности дорожной одежды по общему модулю упругости базируется на измерении упругого прогиба в центре приложения нагрузки, расчете фактического общего модуля упругости и его сопоставления с расчетным (проектным) значением.

5.3 Оценка модулей упругости отдельных конструктивных слоев дорожной одежды и рабочего слоя земляного полотна базируется на аналитико-эмпирическом методе, включающем в себя четыре основных этапа:

- определение фактической чаши динамических прогибов дорожной одежды;
- определение расчетной чаши динамических прогибов дорожной одежды;
- определение модулей упругости слоев дорожной одежды и рабочего слоя земляного полотна на текущем этапе эксплуатации;
- сопоставление фактических модулей упругости с расчетными (проектными) значениями.

Оценку прочности конструктивных слоев дорожных одежд и рабочего слоя земляного полотна целесообразно применять дополнительно к методике оценки прочности дорожной одежды по общему модулю упругости для получения дополнительной информации о состоянии отдельных слоев дорожной конструкции и планирования ремонтных работ.

6 Методика оценки прочности дорожной одежды по общему модулю упругости

6.1 Требования к средствам измерений, вспомогательным устройствам и материалам

При выполнении оценки прочности дорожной одежды по общему модулю упругости применяют:

- установку динамического нагружения падающим грузом в соответствии с ГОСТ 32729. Продолжительность импульса динамического воздействия падающим грузом на дорожную одежду должна составлять от 0,020 до 0,030 с;
- термометр с погрешностью измерения не более 0,5 °С в диапазоне от 0 °С до 45 °С для измерения фактической температуры жидкости. Диаметр измерительной части термометра должен обеспечивать его свободное расположение в высверленном отверстии в асфальтобетоне диаметром не менее 1,2 см;
- пирометр с погрешностью измерения не более 1 °С в диапазоне от 0 °С до 45 °С для измерения температуры покрытия;
- глицерин или смесь воды и глицерина в соотношении не менее 1:1.

6.2 Требования безопасности

Требования безопасности принимают в соответствии с ГОСТ 32729.

6.3 Требования к условиям измерений

Требования к условиям измерений принимают в соответствии с ГОСТ 32729, а также:

- измерение прогибов выполняют при температуре слоя асфальтобетона на глубине 5 см от 5 °С до 30 °С и температуре покрытия от 5 °С до 40 °С;
- не допускается выполнение измерений, если грунт рабочего слоя земляного полотна под дорожной одеждой находится в замерзшем состоянии. В весенний период измерения выполняют, если среднесуточная температура воздуха выше 5 °С наблюдалась не менее 15 дней подряд.

6.4 Подготовка к выполнению измерений

6.4.1 В процессе эксплуатации установки динамического нагружения помимо рекомендаций изготовителя дополнительно рекомендуется выполнять следующие мероприятия:

- не реже чем один раз в семь дней проводить проверку и при необходимости тарировку измерителя пройденного пути, смонтированного на установке или в передвижной дорожной лаборатории. Для проведения проверки необходимо осуществить тестовый проезд по заранее размеченному эталонному участку длиной 1 км;

- непосредственно перед началом проведения измерений проводить проверку установки, состоящую в проведении серии тестовых ударных испытаний, в ходе которых осуществляют подбор высоты сброса груза, для обеспечения требуемой нагрузки на покрытие, нормативного времени нарастания и действия импульса нагрузки;

- перед началом измерений визуально убедиться, что под нагрузочной плитой отсутствуют посторонние предметы и вся поверхность нагрузочной плиты находится в контакте с поверхностью дорожной одежды.

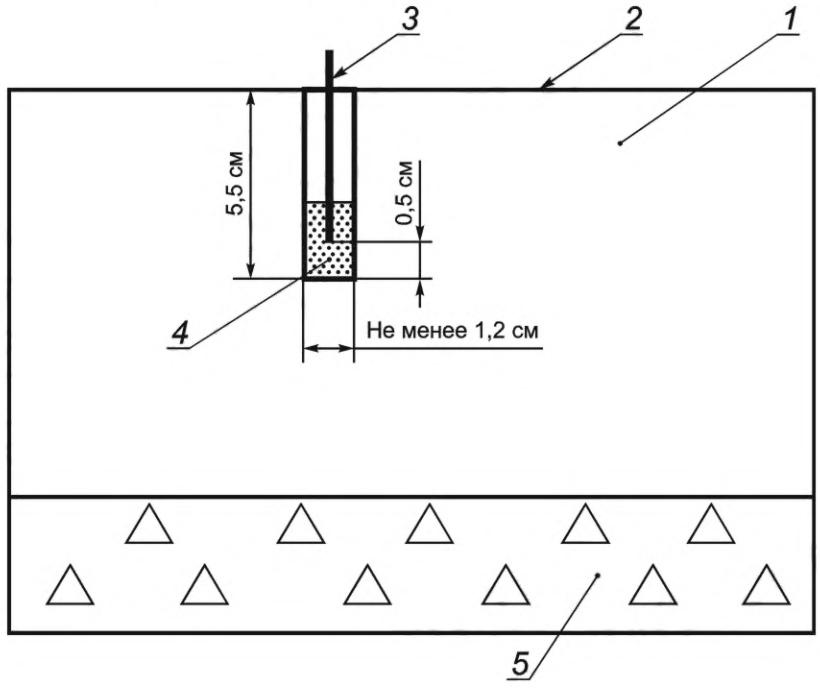
6.4.2 Перед выполнением измерений упругого прогиба на дорогах с покрытием из асфальтобетона необходимо определить фактическую температуру покрытия и слоя асфальтобетона на глубине 5 см. Температуры покрытия и слоя асфальтобетона должны соответствовать требованиям 6.3.

В период выполнения измерений каждый час необходимо осуществлять проведение замеров температуры слоя асфальтобетона в специально подготовленном отверстии в асфальтобетонном покрытии. Для этого на правой полосе наката проезжей части или на укрепленной части обочины из асфальтобетона высверливают отверстие диаметром не менее 1,2 см и глубиной 5,5 см.

Отверстие заполняют глицерином или смесью воды и глицерина в соотношении не менее 1:1, после чего выполняют измерение температуры на глубине 5 см. Глубина погружения термометра должна быть на 0,5 см менее глубины отверстия. Замер температуры проводят до тех пор, пока температура глицерина или смеси не стабилизируется и температура не изменяется более чем на 1 °С в течение одной минуты.

Допускается высверливать отверстия и выполнять замеры температуры в различных точках автомобильной дороги по мере перемещения установки и выполнения испытаний по оценке прочности. Замеры температуры выполняют в наиболее характерной точке на участке измерений.

Схема выполнения измерения температуры асфальтобетона представлена на рисунке 1.



1 — слой асфальтобетона; *2* — поверхность покрытия; *3* — термометр; *4* — смесь глицерина и воды; *5* — слой основания под асфальтобетоном

Рисунок 1 — Схема измерения температуры асфальтобетона

При толщине слоев из асфальтобетона менее 5 см корректировку прогибов по температуре на конкретной автомобильной дороге с известной дорожной одеждой выполняют по зависимостям, определенным с учетом результатов испытаний в контрольной точке. Методика и пример корректировки прогибов по температуре приведены в приложении А. При этом измерения температуры выполняют в слое асфальтобетона на высоте 0,5 см от нижней поверхности слоя.

Примечание — После выполнения измерений температуры, в случае отсутствия необходимости повторных измерений, отверстие рекомендуется залить битумной эмульсией либо другими материалами, позволяющими предотвратить дальнейшее разрушение покрытия.

6.5 Порядок выполнения измерений

Измерение упругого прогиба дорожных одежд выполняют в соответствии с ГОСТ 32729 установкой динамического нагружения падающим грузом.

При выполнении измерений с целью оценки прочности по общему модулю упругости используют только значение упругого прогиба в центре приложения нагрузки.

Рекомендуемый выбор шага измерений в зависимости от цели проведения работ приведен в приложении Б.

6.6 Обработка результатов измерений

6.6.1 Исходные данные для выполнения оценки прочности дорожной одежды по общему модулю упругости:

- фактическую нагрузку на покрытие при испытании, кН (МН), определяют согласно ГОСТ 32729;
- диаметр нагрузочной плиты, мм, указывают в паспорте или эксплуатационных документах на установку динамического нагружения падающим грузом;
- измеренное значение упругого прогиба в центре приложения нагрузки, мм, определяют по ГОСТ 32729;
- температуру асфальтобетона на глубине 5 см в момент испытаний, °С, определяют по 6.4.2;
- расчетный модуль упругости, МПа. Расчетным модулем упругости на дорогах, принимаемых в эксплуатацию, является общий модуль упругости на поверхности дорожной одежды, который принимают согласно проектной документации. На дорогах, находящихся в эксплуатации, расчетный модуль упругости вычисляют с учетом суммарного числа приложений приведенной расчетной нагрузки за нормативный срок службы дорожной одежды по данным фактической интенсивности движения в соответствии с действующими нормативными документами в области проектирования нежестких дорожных одежд. В случае отсутствия данных о фактической интенсивности на дорогах, находящихся в эксплуатации, за расчетный принимают минимальный требуемый модуль упругости на поверхности дорожной одежды согласно проектной документации либо согласно действующим нормативным документам в области проектирования нежестких дорожных одежд.

6.6.2 Алгоритм оценки прочности дорожной одежды по общему модулю упругости

6.6.2.1 Значение динамического упругого прогиба в центре приложения нагрузки, измеренное при фактической температуре слоя асфальтобетона на глубине 5 см, приводят к расчетной температуре, принимаемой при проектировании по критерию упругого прогиба, составляющей 10 °С.

Значение динамического прогиба в центре приложения нагрузки $l^{д0}_{T=10}$, мм, при расчетной температуре 10 °С определяют по формуле

$$l^{д0}_{T=10} = l^{д0}_{T_ф}\left(-0{,}055\cdot\ln(h)+1{,}3563\right)2{,}72^{\left((0{,}004\cdot\ln(h)-0{,}0293)\cdot T_ф\right)}, \quad (1)$$

где h — толщина асфальтобетонных слоев, см (принимается с шагом 1 см согласно проектной документации либо по результатам измерения толщины слоев в соответствии с ГОСТ Р 58349);

$l^{д0}_{Tф}$ — значение динамического прогиба в центре приложения нагрузки при фактической температуре, мм;

$T_ф$ — фактическая температура асфальтобетона при выполнении измерений.

Допускается выполнение корректировки прогиба по температуре на конкретной автомобильной дороге с известной дорожной одеждой по зависимостям, определенным с учетом результатов испытаний в контрольной точке в соответствии с методикой, приведенной в приложении А.

6.6.2.2 Приведение динамического упругого прогиба в центре приложения нагрузки к статическому

Скорректированное с учетом температуры значение динамического упругого прогиба приводят к сопоставимому с расчетным значением статического прогиба $l^{ст}_{T=10}$, мм, по формуле

$$l^{ст}_{T=10} = \left(0{,}3h / h_1 + 1{,}1\right) l^{д0}_{T=10}, \quad (2)$$

где h — фактическая толщина пакета слоев из асфальтобетона, см (принимается с шагом 1 см согласно проектной документации либо по результатам измерения толщины слоев в соответствии с ГОСТ Р 58349);

h_1 — толщина слоев из асфальтобетона, равная 10 см;

$l^{д0}_{T=10}$ — динамический упругий прогиб в центре приложения нагрузки, мм, вычисляемый по формуле (1).

6.6.2.3 Определение фактического модуля упругости

Фактический модуль упругости $E_ф$, МПа, вычисляют по формуле

$$E_ф = \frac{p\ D}{l^{ст}_{T=10}} \cdot \left(1 - \nu^2\right), \quad (3)$$

где D — диаметр нагрузочной плиты, мм;

ν — коэффициент Пуассона, принимаемый равным 0,3;

$l^{ст}_{T=10}$ — статический прогиб при расчетной температуре 10 °С, мм, вычисляемый по формуле (2);

p — удельное давление нагрузочной плиты в зоне контакта с покрытием, МПа, вычисляемое до второго знака после запятой, по формуле

$$p = \frac{F}{S}, \quad (4)$$

где F — нагрузка на дорожное покрытие, МН;

S — площадь нагрузочной плиты, м^2.

В отдельных случаях фактический модуль упругости допускается корректировать с учетом влажности грунта земляного полотна. Методика корректировки модуля упругости с учетом влажности грунта земляного полотна приведена в приложении А.

6.6.2.4 Определение коэффициента прочности дорожной одежды

Коэффициент прочности дорожной одежды $K_{пр}$ вычисляют по формуле

$$K_{пр} = \frac{E_ф}{E_{расч}}, \quad (5)$$

где $E_ф$ — фактический модуль упругости, МПа, вычисляемый по формуле (3);

$E_{расч}$ — расчетный модуль упругости, МПа.

6.7 Оформление результатов

По результатам расчетов составляют протокол оценки прочности, который включает:

- ссылку на протокол измерения упругого прогиба в соответствии с ГОСТ 32729;
- исходные данные в соответствии с 6.6.1;
- результат определения фактического модуля упругости;
- результат определения коэффициента прочности дорожной одежды;
- результаты определения зависимости прогиба от температуры в контрольной точке (если зависимость определена по методике, приведенной в приложении А).

При выполнении диагностики допускается внесение результатов расчета в автоматизированную базу данных без составления протокола.

7 Методика оценки прочности конструктивных слоев дорожной одежды и рабочего слоя земляного полотна

7.1 Требования к средствам измерений, вспомогательным устройствам и материалам

При выполнении оценки прочности конструктивных слоев дорожной одежды и рабочего слоя земляного полотна применяют средства измерений, вспомогательные устройства и материалы в соответствии с 6.1.

На установках динамического нагружения с целью повышения точности расчета помимо измерителей прогиба, указанных в ГОСТ 32729 (см. рисунок 2), допускается применение дополнительных измерителей прогиба, которые рекомендуется располагать на расстоянии (200 ± 5) мм, (450 ± 5) мм и (2100 ± 5) мм от центра приложения нагрузки (см. рисунок 3).

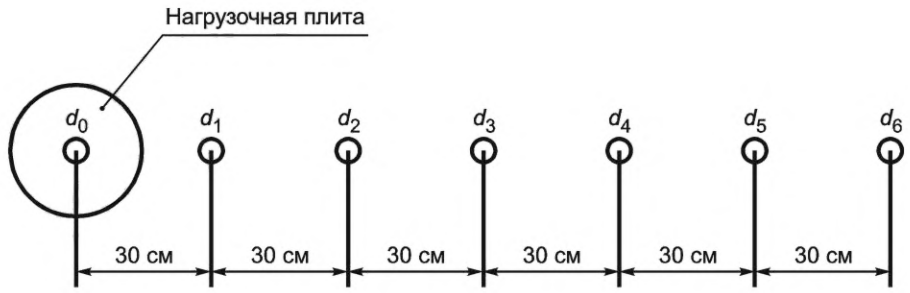


Рисунок 2 — Схема расположения измерителей прогиба без применения дополнительных измерителей

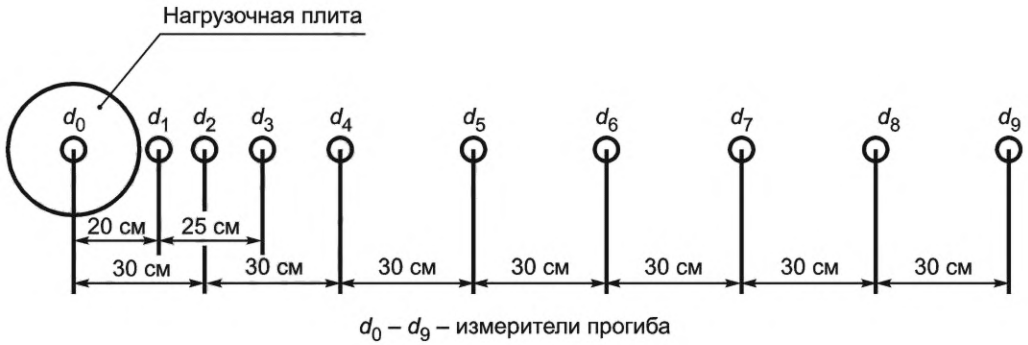


Рисунок 3 — Схема расположения измерителей прогиба, включая дополнительные измерители

Примечание — Применение дополнительных измерителей прогиба не меняет схему расчета, но приводит к повышению его точности.

Референтной методикой является методика измерения установкой динамического нагружения в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.

7.2 Требования безопасности

Требования безопасности принимают в соответствии с ГОСТ 32729.

7.3 Требования к условиям измерений

Требования к условиям измерений принимают в соответствии с 6.3.

7.4 Подготовка к выполнению измерений

Подготовку к выполнению измерений выполняют в соответствии с 6.4.

7.5 Порядок выполнения измерений

Измерение упругого прогиба дорожных одежд выполняют в соответствии с ГОСТ 32729 установкой динамического нагружения падающим грузом.

При выполнении измерений с целью оценки прочности отдельных конструктивных слоев и рабочего слоя земляного полотна используют как значения упругого прогиба в центре приложения нагрузки, так и с измерителей прогиба, указанных в 7.1.

Рекомендуемый выбор шага измерений в зависимости от цели проведения работ приведен в приложении Б.

7.6 Обработка результатов измерений

7.6.1 При выполнении измерений с целью оценки прочности отдельных конструктивных слоев и рабочего слоя земляного полотна результаты измерений упругих прогибов в каждой точке должны соответствовать следующему неравенству:

$$l(d_0) > l(d_1) > l(d_2) > l(d_3) > l(d_4) > l(d_5) > l(d_6) > l(d_7) > \ldots > l(d_i), \quad (6)$$

где $l(d_0)$ — $l(d_i)$ — прогибы на измерителях прогиба, расположенных по мере удаления от центра приложения нагрузки, мм.

Результаты, не соответствующие неравенству (6), для последующих расчетов модулей упругости конструктивных слоев не используют.

7.6.2 Метод оценки модулей упругости конструктивных слоев эксплуатируемых дорожных одежд типа выполняют по следующему алгоритму:

а) определение фактической чаши динамических прогибов:

1) измерение упругих прогибов и температуры асфальтобетона в соответствии с 7.5;

2) корректировка упругих прогибов с учетом фактической температуры асфальтобетона при измерениях;

б) определение расчетной чаши прогибов:

1) определение параметров динамического нагружения (максимальная нагрузка, диаметр нагрузочной плиты, давление на покрытие);

2) определение фактической толщины и нормативных значений модулей упругости слоев дорожной одежды;

3) определение точек, в которых проводят расчет упругих прогибов (соответствующих расположению измерителей прогиба при измерении фактической чаши динамических прогибов);

4) построение расчетной чаши динамических прогибов на основе механико-математической модели НДС дорожной одежды;

в) определение модулей упругости слоев дорожной одежды на текущем этапе эксплуатации:

1) оценка совпадения расчетной и фактической чаш прогибов;

2) в случае расхождения значений прогибов более чем на 10 % по каждой точке, соответствующей положению измерителя чаши прогиба при выполнении измерений динамическим нагружением, — выполнение корректировки модулей упругости материалов слоев;

3) в случае совпадения расчетной и фактической чаш прогибов (расхождение менее 10 % по каждой точке) — определение значений модулей упругости материалов слоев.

7.6.3 Для оценки прочности конструктивных слоев дорожной одежды в ходе численного моделирования НДС дорожной конструкции задают следующий комплекс исходных данных:

- фактическую нагрузку на покрытие при испытании, кН (МН), определяют по результатам испытаний по ГОСТ 32729;

- диаметр нагрузочной плиты, мм, указывают в паспорте или эксплуатационных документах на установку;

- измеренные значения упругого прогиба на всех измерителях прогиба, мм, определяют по ГОСТ 32729;

- температуру асфальтобетона на глубине 5 см в момент испытаний, °С, определяют по 6.4.2;

- материалы конструктивных слоев дорожных одежд и тип грунта рабочего слоя земляного полотна принимают из проектной документации, по данным паспорта на обследуемый участок либо определяют при выполнении подготовительных работ путем вскрытия конструкции.

Примечание — Для материалов определяют данные, позволяющие оценить их расчетный модуль упругости, например: для асфальтобетона — вид асфальтобетона, вид и марка битумного вяжущего; для укрепленных материалов и грунтов — вид материала, вид и марка вяжущего; для неукрепленных материалов — вид материала, крупность зерен и т.д;

- толщины конструктивных слоев дорожных одежд, см, принимают из проектной документации, по данным паспорта на обследуемый участок либо определяют в соответствии с ГОСТ Р 58349;
- проектные модули упругости материалов конструктивных слоев дорожных одежд и грунта рабочего слоя земляного полотна, МПа, принимают в соответствии с проектной документацией либо в соответствии с действующими на момент проектирования нормативными документами в данной области;
- объемные (средние) плотности материалов, кг/м^3, принимают из проектной документации, либо из нормативных документов по проектированию, действовавших на момент проектирования дорожной одежды, или по результатам лабораторных испытаний.

При отсутствии проектных данных о конструкции дорожной одежды (материалах слоев, толщинах слоев и типе грунта земляного полотна) перед выполнением измерений прогибов выполняют определение данных о конструкции разрушающим методом либо совместным использованием разрушающего и георадиолокационного метода в соответствии с ГОСТ Р 58349.

7.6.4 Количество слоев, для которых выполняют расчет модулей упругости, составляет от 2 до 5.

Рекомендуемое количество слоев, для которых выполняют расчет модулей упругости, — 4, а именно:

- объединенный слой асфальтобетона;
- несущий слой основания;
- дополнительный слой основания;
- рабочий слой грунта земляного полотна.

Для асфальтобетона средневзвешенный модуль упругости $E_{ср}$ вычисляют по формуле

$$E_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i h_i}{\sum_{i=1}^{n} h_i}, \quad (7)$$

где E_i — модуль упругости i-го слоя, МПа;

h_i — толщина i-го слоя, см.

При наличии трех и более слоев основания (включая дополнительный слой) допускается объединять несущие слои и рассчитывать средневзвешенный модуль упругости по формуле (7), а в качестве толщины принимать суммарную толщину слоев. При этом не рекомендуется объединять в один слой слои основания из укрепленных и неукрепленных материалов.

Полученные по результатам расчета в соответствии с приложением В значения фактических модулей упругости асфальтобетонных слоев с учетом продолжительности импульса установки динамического нагружения приводят к сопоставимым с проектными значениями.

Откорректированный фактический модуль упругости асфальтобетонных слоев при температуре 10 °С и с продолжительностью импульса 0,1 с $E_{T=10}^{t=0,1}$, мм, вычисляют по формуле

$$E_{T=10}^{t=0,1} = 0,88E_{УДН} - 4,72T_p, \quad (8)$$

где $E_{УДН}$ — фактический модуль упругости асфальтобетонных слоев, при продолжительности импульса от 0,020 до 0,030 с, рассчитанный по результатам измерений установкой динамического нагружения в соответствии с приложением В;

T_p — расчетная температура асфальтобетона на глубине 5 см, принимаемая равной 10 °С.

7.6.5 Фактическая чаша прогибов должна быть откорректирована с учетом фактической температуры слоя асфальтобетона в момент измерений. Для этого выполняют приведение значений прогибов, определенных при фактической температуре, к значениям прогибов при расчетной температуре.

Значение динамического прогиба в центре приложения нагрузки $l^{д0}_{T=10}$, мм, при расчетной температуре 10 °С определяют по формуле (1).

Значение динамического прогиба на измерителе прогиба, расположенном на расстоянии (200 ± 5) мм от центра приложения нагрузки, при расчетной температуре 10 °С, $l^{д200}_{T=10}$, мм, определяют по формуле

$$l^{д200}_{T=10} = l^{д200}_{T_ф}(-0,043\ln(h)+1,2607)2,72^{((0,0045\cdot\ln(h)-0,0258)\cdot T_ф)}, \quad (9)$$

где $l^{д200}_{T_ф}$ — значение динамического прогиба на расстоянии (200 ± 5) мм от центра приложения нагрузки при фактической температуре, мм;

h — толщина асфальтобетонных слоев, см (принимается с шагом 1 см согласно проектной документации либо по результатам измерения толщины слоев в соответствии с ГОСТ Р 58349);

$T_ф$ — фактическая температура асфальтобетона при выполнении измерений.

Значение динамического прогиба на измерителе прогиба, расположенном на расстоянии (300 ± 5) мм от центра приложения нагрузки, при расчетной температуре 10 °С, $l^{д300}_{T=10}$, мм, определяют по формуле

$$l^{д300}_{T=10} = l^{д300}_{T_ф}(-0,031\ln(h)+1,2107)2,72^{((0,004\cdot\ln(h)-0,0233)\cdot T_ф)}, \quad (10)$$

где $l^{д300}_{T_ф}$ — значение динамического прогиба на расстоянии (300 ± 5) мм от центра приложения нагрузки при фактической температуре, мм.

Значение динамического прогиба на измерителе прогиба, расположенном на расстоянии (450 ± 5) мм от центра приложения нагрузки, при расчетной температуре 10 °С, $l^{д450}_{T=10}$, мм, определяют по формуле

$$l^{д450}_{T=10} = l^{д450}_{T_ф}(-0,03\ln(h)+1,1856)2,72^{((0,0035\cdot\ln(h)-0,0198)\cdot T_ф)}, \quad (11)$$

где $l^{д450}_{T_ф}$ — значение динамического прогиба на расстоянии (450 ± 5) мм от центра приложения нагрузки при фактической температуре, мм.

Значение динамического прогиба на измерителе прогиба, расположенном на расстоянии (600 ± 5) мм от центра приложения нагрузки, при расчетной температуре 10 °С, $l^{д600}_{T=10}$, мм, определяют по формуле

$$l^{д600}_{T=10} = l^{д600}_{T_ф}(-0,044\ln(h)+1,2111)2,72^{((0,004\cdot\ln(h)-0,0198)\cdot T_ф)}, \quad (12)$$

где $l^{д600}_{T_ф}$ — значение динамического прогиба на расстоянии (600 ± 5) мм от центра приложения нагрузки при фактической температуре, мм.

Значение динамического прогиба на измерителе прогиба, расположенном на расстоянии (900 ± 5) мм от центра приложения нагрузки, при расчетной температуре 10 °С, $l^{д900}_{T=10}$, мм, определяют по формуле

$$l^{д900}_{T=10} = l^{д900}_{T_ф}(-0,07\ln(h)+1,2625)2,72^{((0,007\cdot\ln(h)-0,0261)T_ф)}, \quad (13)$$

где $l^{д900}_{T_ф}$ — значение динамического прогиба на расстоянии (900 ± 5) мм от центра приложения нагрузки при фактической температуре, мм.

Значение динамического прогиба на измерителе прогиба, расположенном на расстоянии (1200 ± 5) мм от центра приложения нагрузки, при расчетной температуре 10 °С, $l_{T=10}^{д1200}$, мм, определяют по формуле

$$l_{T=10}^{д1200} = l_{T_ф}^{д1200}(-0,083\ln(h)+1,2922)2,72^{((0,0076\cdot\ln(h)-0,0266)T_ф)}, \quad (14)$$

где $l_{T_ф}^{д1200}$ — значение динамического прогиба на расстоянии (1200 ± 5) мм от центра приложения нагрузки при фактической температуре, мм.

Значение динамического прогиба на измерителе прогиба, расположенном на расстоянии (1500 ± 5) мм от центра приложения нагрузки, при расчетной температуре 10 °С, $l_{T=10}^{д1500}$, мм, определяют по формуле

$$l_{T=10}^{д1500} = l_{T_ф}^{д1500}(-0,032\ln(h)+1,135)2,72^{((0,0031\cdot\ln(h)-0,013)\cdot T_ф)}, \quad (15)$$

где $l_{T_ф}^{д1500}$ — значение динамического прогиба на расстоянии (1500 ± 5) мм от центра приложения нагрузки при фактической температуре, мм.

Значение динамического прогиба на измерителе прогиба, расположенном на расстоянии (1800 ± 5) мм от центра приложения нагрузки, при расчетной температуре 10 °С, $l_{T=10}^{д1800}$, мм, определяют по формуле

$$l_{T=10}^{д1800} = l_{T_ф}^{д1800}(-0,009\ln(h)+1,0659)2,72^{((0,0009\cdot\ln(h)-0,0064)\cdot T_ф)}, \quad (16)$$

где $l_{T_ф}^{д1800}$ — значение динамического прогиба на расстоянии (1800 ± 5) мм от центра приложения нагрузки при фактической температуре, мм.

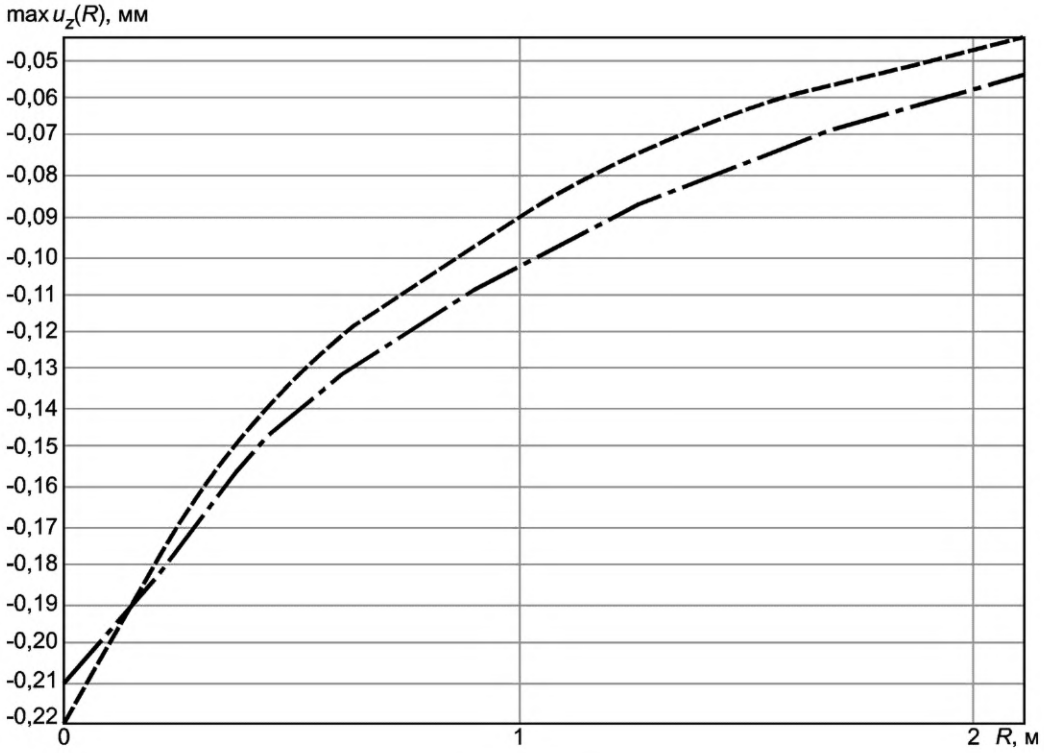
Упругие прогибы на измерителях, расположенных на расстоянии более 1800 мм от центра приложения нагрузки, не корректируют с учетом температуры и для дальнейшего расчета принимают измеренные значения.

Допускается выполнение корректировки прогибов по температуре на конкретной автомобильной дороге с известной дорожной одеждой по зависимостям, определенным с учетом результатов испытаний в контрольной точке, приведенным в приложении А.

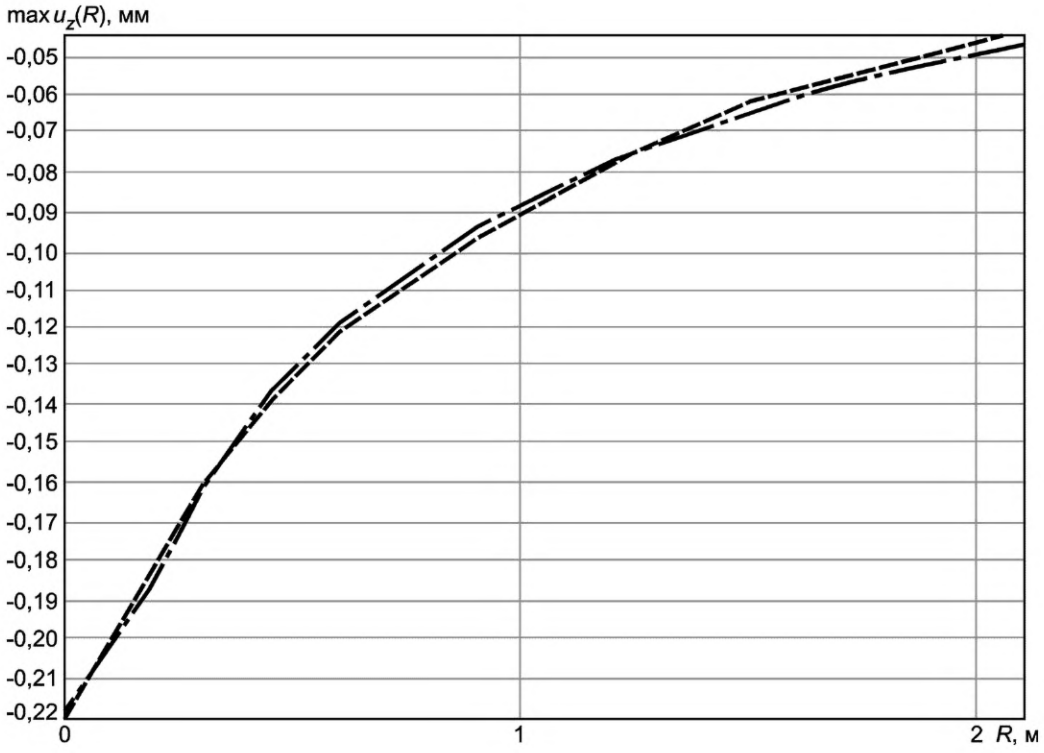
7.6.6 Расчет модулей упругости конструктивных слоев дорожной одежды

При построении расчетной чаши динамических прогибов задают точки на поверхности дорожной конструкции, в которых проводят вычисление максимальных значений вертикальных перемещений точек поверхности дорожной конструкции, формирующих чашу прогиба. Координаты точек должны соответствовать местоположению измерителей прогиба при проведении экспериментальных замеров.

После построения расчетной чаши максимальных динамических прогибов проводят ее сопоставление с фактической чашей, зарегистрированной установкой динамического нагружения. Если отклонение между значениями вертикальных перемещений в пределах чаш прогибов по каждому из измерителей превышает 10 %, проводят их корректировку с одновременным пересчетом модулей упругости слоев дорожной конструкции. Корректировку останавливают по достижении расхождения между значениями вертикальных перемещений не более 10 %. Расчетная и фактическая чаши прогибов дорожной конструкции до и после корректировки представлены на рисунке 4.



а) До корректировки



б) После корректировки

— фактическая чаша прогибов; — расчетная чаша прогибов

Рисунок 4 — Расчетная и фактическая чаши максимальных динамических прогибов дорожной конструкции

Выходными данными после корректировки чаш прогибов дорожной конструкции являются значения модулей упругости слоев покрытия, основания и грунта земляного полотна на стадии эксплуатации.

Основные уравнения математической модели для определения модулей упругости отдельных конструктивных слоев принимаются в соответствии с приложением В.

7.6.7 Оценка прочности конструктивных слоев дорожных одежд

Рассчитанные фактические значения модулей упругости конструктивных слоев (слоев покрытия и основания) и рабочего слоя земляного полотна на стадии эксплуатации сопоставляют с проектными значениями.

Результаты, полученные на основе аналитико-эмпирического метода оценки модулей упругости слоев эксплуатируемых дорожных конструкций, позволяют:

- определить значение модуля упругости каждого слоя дорожной одежды и грунта земляного полотна на стадии эксплуатации и сопоставить с проектными значениями, а также использовать при разработке проектов капитального ремонта нежестких дорожных одежд;
- осуществить выбор рациональных ремонтных мероприятий, направленных в первую очередь на ликвидацию причины снижения несущей способности эксплуатируемой дорожной конструкции.

7.7 Оформление результатов

По результатам расчетов составляют протокол оценки прочности конструктивных слоев, который включает следующее:

- ссылку на протокол измерения упругого прогиба в соответствии с ГОСТ 32729;
- исходные данные в соответствии с 7.6.3;
- отчетные материалы по результатам георадарного обследования (в случае использования георадарного метода) с учетом требований ГОСТ Р 58349, а также рекомендаций [2];
- результат расчета модулей упругости конструктивных слоев;
- результат сопоставления проектных и фактических модулей упругости.

При выполнении диагностики допускается внесение результатов расчета в автоматизированную базу данных без составления протокола.

7.8 Пример оценки прочности дорожной одежды по общему модулю упругости и модулям упругости отдельных конструктивных слоев приведен в приложении Г.

7.9 Тестовые примеры для валидации и отладки программных комплексов приведены в приложении Д.

7.10 Форма таблицы с сопоставлением проектных и фактических модулей упругости приведена в приложении Е.

Приложение А
(рекомендуемое)

Методики корректировки прогибов по температуре и корректировки модуля упругости с учетом влажности грунта рабочего слоя земляного полотна

А.1 Методика корректировки прогибов по температуре на автомобильной дороге с известной дорожной конструкцией по результатам измерений в контрольной точке

А.1.1 Общие положения

С учетом разнообразия дорожных конструкций и зависимостей фактических чаш динамических прогибов от температуры слоя асфальтобетона допускается определять зависимость прогибов от температуры на автомобильной дороге с известной конструкцией по результатам испытаний в контрольной точке. Данной методикой также целесообразно пользоваться на участках автомобильных дорог с толщиной слоя асфальтобетона менее 5 см.

Контрольной точкой является наиболее характерная точка на автомобильной дороге с известными толщинами и материалами конструктивных слоев, а также грунтом земляного полотна. На автомобильной дороге допускается выбирать несколько контрольных точек в зависимости от результатов предварительных исследований, определения материалов конструктивных слоев и измерения их толщины в соответствии с ГОСТ Р 58349.

Контрольная точка должна находиться на расстоянии не менее 1,5 м от края покрытия. В контрольной точке не должно быть дефектов покрытия, определяемых при визуальной оценке (трещин, просадок, выбоин, колеи и т.д.), если это не является характерными дефектами для всего обследуемого участка. При невозможности соблюдения данного условия необходимо сделать соответствующую запись о наличии дефектов и их местоположении относительно измерителей прогиба в протоколе испытаний.

Для определения зависимости прогиба от температуры асфальтобетона на глубине 5 см на контрольной точке проводят измерения прогиба и температуры для различных периодов времени. При толщине слоев из асфальтобетона менее 5 см измерения температуры выполняют в слое асфальтобетона на высоте 0,5 см от нижней поверхности слоя.

Измерения прогибов и температуры асфальтобетона выполняют в соответствии с 6.4.2 настоящего стандарта. Количество измерений на одной контрольной точке должно составлять не менее 12 при различной температуре асфальтобетона. Измерения должны быть выполнены таким образом, чтобы они попадали не менее чем в три температурных диапазона с шагом 5 °С, при этом в каждом из температурных диапазонов должно быть не менее трех результатов измерений. Температурные диапазоны принимают с шагом 5 °С: от 5 °С до 10 °С, от 10 °С до 15 °С, от 15 °С до 20 °С, от 20 °С до 25 °С, от 25 °С до 30 °С, от 30 °С до 35 °С.

По результатам измерений прогибов и определения температуры асфальтобетона строят зависимость прогиба от температуры и при помощи программных продуктов определяют формулу для вычисления прогибов при расчетной температуре.

При выполнении оценки прочности по общему модулю упругости зависимость определяют для прогиба на измерителе, расположенном в центре приложения нагрузки. При оценке прочности отдельных конструктивных слоев зависимость определяют для измерителей, расположенных на расстоянии до 1800 мм от центра приложения нагрузки. Коэффициент детерминации прогибов на первом измерителе прогибов должен составлять не менее 0,90. Фактическое значение не должно отклоняться от значений на полученной кривой, описывающей зависимость прогиба от температуры более чем на 10 %. В случае несоблюдения данных требований необходимо выполнение дополнительных испытаний.

После определения зависимости для корректировки прогибов от температуры на оцениваемой дорожной конструкции, идентичной контрольной точке, проводят измерения прогибов и температуры покрытия в необходимом объеме в зависимости от поставленной задачи в соответствии с настоящим стандартом. После этого с учетом результатов измерений на контрольной точке корректируют результаты измерений по полученной зависимости.

А.1.2 Пример корректировки прогиба по температуре на автомобильной дороге с известной дорожной конструкцией по зависимостям, определенным с учетом результатов испытаний в контрольной точке

Конструкция дорожной одежды представлена в таблице А.1.

Таблица А.1 — Конструкция дорожной одежды на участке автомобильной дороги

Наименование конструктивного элемента	Толщина слоя, см
Асфальтобетон	20
Щебеночно-песчаная смесь	33
Песчано-подстилающий слой	50
Грунт земляного полотна — пылеватый суглинок	Безразмерная, не ограничена снизу

Результаты измерений прогибов при различной температуре асфальтобетона представлены в таблице А.2.

График зависимости прогиба от температуры асфальтобетона на глубине 5 см на измерителе, расположенном в центре нагрузочной плиты, d_0 представлен на рисунке А.1.

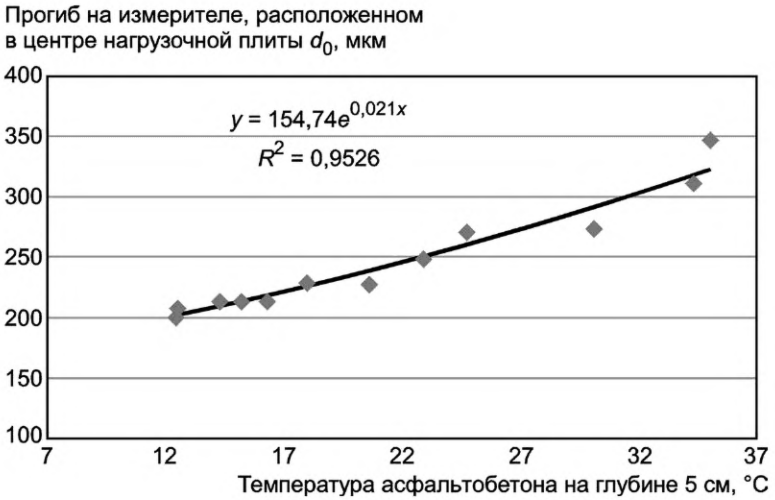


Рисунок А.1 — График зависимости прогиба от температуры асфальтобетона на глубине 5 см на измерителе в центре нагрузочной плиты d_0

График зависимости прогиба от температуры асфальтобетона на глубине 5 см на измерителе, расположенном на расстоянии 200 мм от центра нагрузочной плиты, d_1 представлен на рисунке А.2.

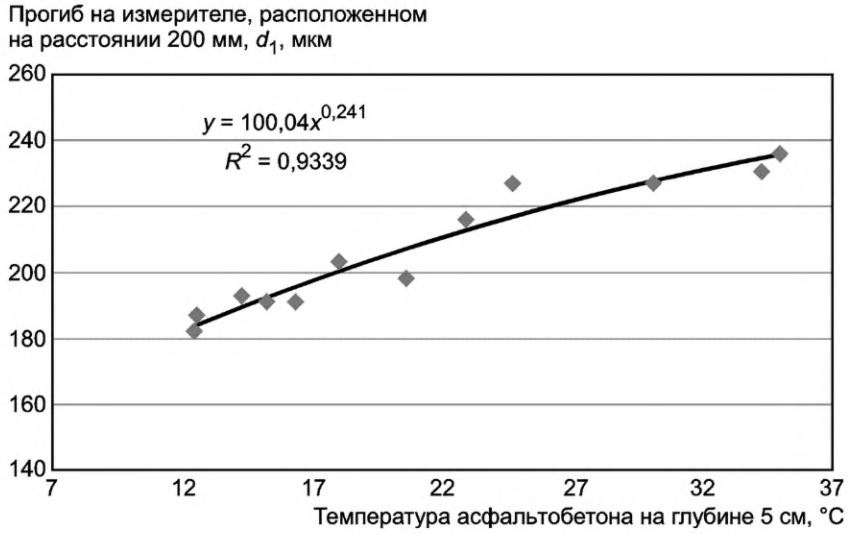


Рисунок А.2 — График зависимости прогиба от температуры асфальтобетона на глубине 5 см на измерителе, расположенном на расстоянии 200 мм от центра нагрузочной плиты, d_1

Примечание — Графики построены при помощи программного комплекса MS Excel.

По полученным зависимостям, представленным на рисунках А.1 и А.2, вычисляют значение прогиба при расчетной температуре 10 °С.

На первом измерителе прогиба, расположенном в центре нагрузочной плиты, прогиб d_0 при температуре 10 °С, мкм, вычисляют по формуле

$$y(d_0) = 154{,}74e^{0{,}021x} = 154{,}74 \cdot 2{,}718^{0{,}021 \cdot 10} = 190. \quad (А.1)$$

На втором измерителе прогиба, расположенном на расстоянии 200 мм, прогиб d_1 при температуре 10 °С, мкм, вычисляют по формуле

$$y(d_1) = 100{,}04x^{0{,}241} = 100{,}04 \cdot 10^{0{,}241} = 174. \quad (А.2)$$

Таблица А.2 — Результаты измерений прогибов при различной температуре асфальтобетона

Номер измерения	Давление, кПа	Нагрузка, кН	Прогибы на измерителе, d_i, мкм										Температура асфальтобетона на глубине 5 см, °С
			d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	
1	800	57	347	236	210	170	141	93	68	50	38	31	35,0
2	812	57	273	227	200	165	140	100	74	56	43	32	30,1
3	812	57	270	227	201	167	142	99	72	54	41	32	24,7
4	806	57	310	231	205	168	141	97	71	53	40	32	34,3
5	815	58	247	216	195	164	141	101	74	55	43	30	22,9
6	797	56	207	187	171	147	130	96	72	53	40	30	12,5
7	805	57	228	203	184	157	137	100	74	54	40	30	18,0
8	807	57	213	191	173	147	129	95	71	53	40	30	16,3
9	805	57	227	198	179	151	131	95	71	53	39	29	20,6
10	802	57	200	182	167	144	127	95	71	54	42	31	12,4
11	807	57	213	193	175	150	132	97	72	55	43	31	14,3
12	806	57	213	191	174	149	130	96	72	54	42	30	15,2

А.2 Методика корректировки фактического модуля упругости с учетом влажности грунта рабочего слоя земляного полотна

А.2.1 Общие положения

Методика корректировки фактического модуля упругости с учетом влажности грунта рабочего слоя земляного полотна рекомендуется к применению на автомобильных дорогах с монолитными слоями толщиной менее 12 см и/или общей толщиной дорожной одежды менее 60 см, на которых рабочий слой выполнен из связных грунтов (кроме пылеватого песка) и испытания выполнены в нерасчетный период года.

Расчетным периодом года считается наиболее неблагоприятный по условиям увлажнения грунта земляного полотна и температуре слоев из асфальтобетона период года, в течение которого возможно накопление остаточных деформаций.

Нерасчетным периодом года считается период года, находящийся за пределами расчетного периода, в течение которого слои дорожной одежды и грунт земляного полотна имеют положительную температуру.

Учет влажности грунта земляного полотна выполняют при наличии следующих исходных данных:

- тип грунта рабочего слоя земляного полотна (принимают из проектной документации, по данным паспорта на обследуемый участок либо определяют при выполнении подготовительных работ путем вскрытия конструкции);
- расчетная относительная влажность грунта рабочего слоя земляного полотна (принимают из проектной документации либо в соответствии с действующими нормативными документами в области проектирования нежестких дорожных одежд);

- общая толщина дорожной одежды от верха покрытия до рабочего слоя грунта земляного полотна, в сантиметрах (принимают из проектной документации, по данным паспорта на обследуемый участок либо определяют в соответствии с ГОСТ Р 58349).

А.2.2 Методика корректировки фактического модуля упругости

А.2.2.1 Корректировку фактического модуля упругости с учетом влажности грунта рабочего слоя земляного полотна выполняют в следующей последовательности:

а) выполняют измерения прогиба и расчет фактического модуля упругости $E_ф$ в соответствии с 6.1—6.6.2.3.

При подготовке к выполнению измерений на обочине автомобильной дороги на глубине, приблизительно соответствующей низу дорожной одежды, необходимо вскрыть шурф для отбора грунта земляного полотна.

Глубина шурфа должна быть не менее 50 см.

Из шурфа отбирают необходимое количество грунта для определения его типа, естественной влажности и влажности на границе текучести в лаборатории.

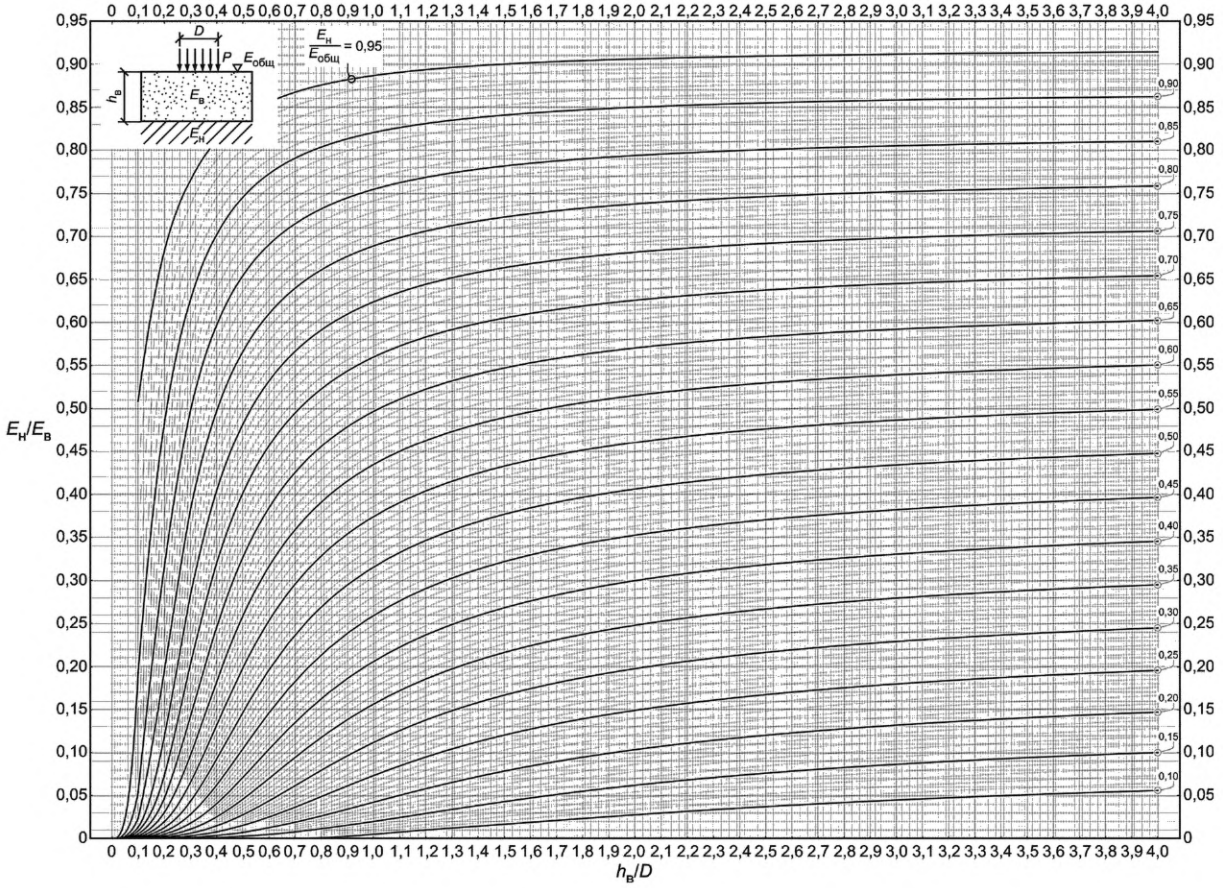
Тип грунта определяют в соответствии с ГОСТ 5180 и ГОСТ 33063.

Естественную влажность и влажность грунта на границе текучести определяют в соответствии с ГОСТ 5180.

Относительную влажность грунта определяют как отношение естественной влажности к влажности на границе текучести;

б) в соответствии с действующими нормативными документами в области проектирования нежестких дорожных одежд определяют расчетный модуль упругости грунта при фактической влажности;

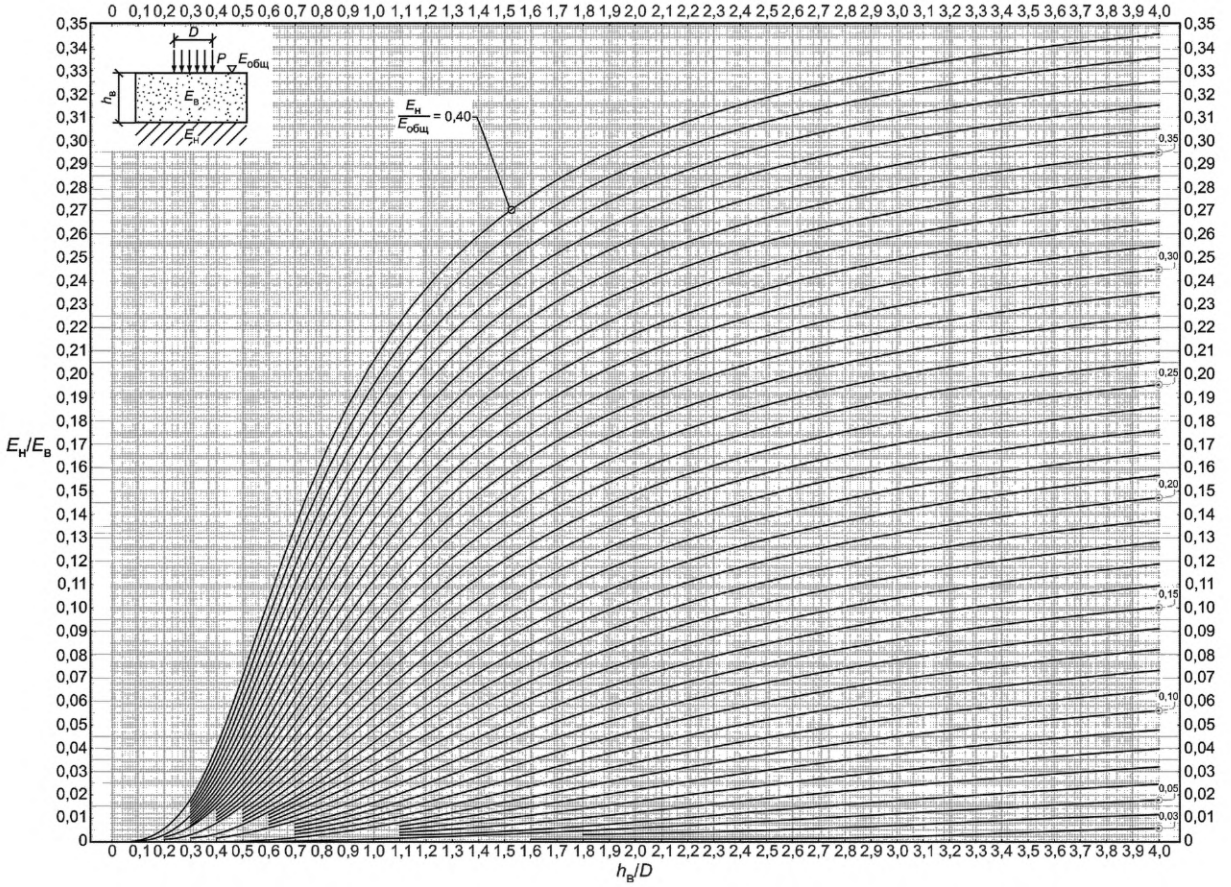
в) по значениям фактического модуля упругости, определенного по формуле (3) и значению расчетного модуля грунта при фактической влажности в соответствии с номограммами, представленными на рисунках А.3 и А.4, определяют значение модуля упругости дорожной одежды в двухслойной системе дорожная одежда — грунт;



Примечание — Цифры, приведенные на кривых, — отношение $E_в/E_{общ}$.

$E_н$ — модуль упругости нижнего слоя, $E_в$ — модуль упругости верхнего слоя, D — диаметр нагрузочной плиты, $h_в$ — толщина верхнего слоя, p — удельное давление нагрузочной плиты в зоне контакта с покрытием, $E_{общ}$ — общий модуль упругости на поверхности верхнего слоя

Рисунок А.3 — Номограмма для определения общего модуля упругости верхнего слоя двухслойной системы $E_в$ при $h_в/D$ = 0—4,0



Примечание — Цифры, приведенные на кривых, — отношение $E_в/E_{общ}$.

$E_н$ — модуль упругости нижнего слоя, $E_в$ — модуль упругости верхнего слоя, D — диаметр нагрузочной плиты, $h_в$ — толщина верхнего слоя, p — удельное давление нагрузочной плиты в зоне контакта с покрытием, $E_{общ}$ — общий модуль упругости на поверхности верхнего слоя

Рисунок А.4 — Укрупненная деталь номограммы для определения общего модуля упругости верхнего слоя двухслойной системы $E_в$ при $h_в/D$ = 0—4,0

г) в соответствии с действующими нормативными документами в области проектирования нежестких дорожных одежд определяют расчетный модуль упругости грунта при расчетной влажности;

д) по значениям модуля упругости дорожной одежды, определенного в перечислении в), и значению расчетного модуля упругости грунта при расчетной влажности в соответствии с действующими нормативными документами в области проектирования нежестких дорожных одежд определяют скорректированный с учетом влажности грунта фактический модуль упругости $E_ф^{вл}$;

е) коэффициент прочности дорожной одежды $K_{пр}$ вычисляют по формуле

$$K_{пр} = \frac{E_ф^{вл}}{E_{расч}}, \quad (А.3)$$

где $E_ф^{вл}$ — фактический модуль упругости, МПа, скорректированный с учетом влажности грунта рабочего слоя, МПа;

$E_{расч}$ — расчетный модуль упругости, МПа.

А.2.3 Пример расчета

Исходные данные:

- фактический модуль упругости, определенный по разделу 6, — 300 МПа;
- расчетный модуль упругости — 250 МПа;
- фактическая толщина дорожной одежды от верха покрытия до грунта рабочего слоя — 55 см;

- грунт — тяжелый суглинок, расчетная относительная влажность 0,7, расчетный модуль упругости 41 МПа;

- фактическая относительная влажность — 0,6, расчетный модуль упругости при фактической влажности — 72 МПа;

- расчетный диаметр отпечатка колеса — 34,5 см.

Расчет:

- при следующих параметрах, принимаемых для расчета: $h_в/D$ = 55/34,5 = 1,59; $E_н/E_{общ}$ = 72/300 = 0,24, по рисункам А.3 и А.4 определяют $E_н/E_в$ = 0,117 и рассчитывают осредненный модуль упругости дорожной одежды (без грунта рабочего слоя) $E_{ДО}$ = 72/0,117 = 615 МПа;

- при следующих параметрах, принимаемых для расчета: $h_в/D$ = 85/34,5 = 1,59; $E_н/E_в$ = 41/615 = 0,066 в соответствии с действующими нормативными документами, в области проектирования нежестких дорожных одежд определяют $E_{общ}/E_в$ = 0,39, скорректированный с учетом влажности грунта фактический модуль упругости $E_ф^{вл}$ = 615·0,39 = 240 МПа;

- вычисляют коэффициент прочности дорожной одежды $K_{пр}$ по формуле (А.3):

$$K_{пр} = \frac{E_ф^{вл}}{E_{расч}} = \frac{240}{250} = 0,96.$$

Приложение Б
(справочное)

Выполнение измерений в зависимости от цели проведения работ

Б.1 Выбор шага измерений в зависимости от цели проведения работ

Полученные результаты могут быть использованы для оценки прочности в следующих основных случаях:

- выполнение диагностики и паспортизации автомобильных дорог в соответствии с требованиями ГОСТ 33388 и [1];
- решение вопроса о назначении и виде ремонтных мероприятий в период эксплуатации автомобильных дорог;
- решение вопроса об усилении существующих дорожных одежд.

При выполнении работ по диагностике и паспортизации автомобильных дорог шаг измерений рекомендуется принимать:

- не более 200 м — при паспортизации, полной и плановой диагностике;
- не более 50 м — при приемочной диагностике.

При плановой диагностике выполнение оценки прочности рекомендуется в соответствии с Б.2.

При выполнении работ с целью принятия решения о назначении и виде работ по обеспечению сохранности обследуемого участка [содержание (устройство защитных слоев или слоев износа), ремонт, капитальный ремонт] шаг измерений рекомендуется принимать не более 100 м.

При выполнении работ с целью решения вопроса об усилении существующих дорожных одежд (капитальный ремонт, реконструкция) шаг измерений рекомендуется принимать не более 50 м.

Допускается на отдельных участках выполнять измерения с шагом менее 50 м по требованию заказчика.

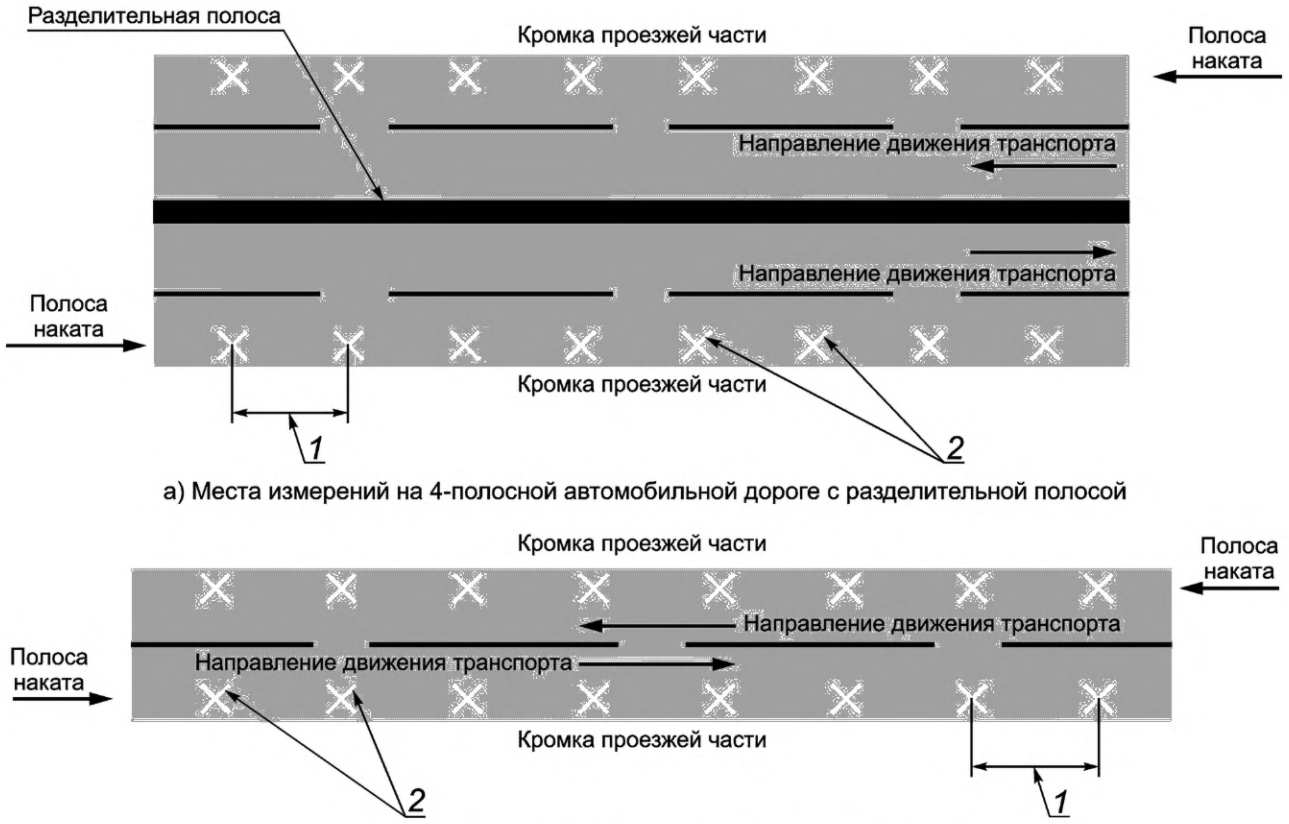
На автомобильных дорогах с монолитными слоями толщиной менее 12 см и/или общей толщиной дорожной одежды менее 60 см, а также на дорогах, на которых при визуальной оценке выявлена неоднородность состояния дорожного покрытия, шаг измерений рекомендуется принимать не более 50 м.

В зависимости от цели проведения работ по оценке прочности дорожной одежды допускается изменять шаг измерений. Перед выполнением измерений целесообразно выполнение предварительной визуальной оценки состояния покрытия и дифференциации шага измерений в зависимости от ее результатов.

Для назначения мест более детального обследования дорожной одежды, а также уточнения толщин и материалов конструктивных слоев дорожных одежд участков большой протяженностью целесообразно выполнение измерений установками динамического нагружения по ГОСТ 32729 совместно с георадиолокационным методом измерений толщин конструктивных слоев в соответствии с ГОСТ Р 58349.

Измерения выполняют по правой полосе наката крайней правой полосы движения автомобильной дороги. В зависимости от целей измерений по согласованию с заказчиком допускается проведение измерений по внутренним полосам движения.

Примеры выбора мест измерений в зависимости от количества полос представлены на рисунке Б.1.



а) Места измерений на 4-полосной автомобильной дороге с разделительной полосой

б) Места измерений на 2-полосной автомобильной дороге

1 — расстояние между точками измерения; *2* — точки измерения

Рисунок Б.1 — Примеры выбора мест измерений в зависимости от количества полос

Б.2 Выполнение оценки прочности при плановой диагностике автомобильных дорог

При плановой диагностике автомобильных дорог прочность дорожной одежды определяют по общему модулю упругости в соответствии с разделом 6.

На автомобильных дорогах с монолитными слоями толщиной менее 12 см и/или общей толщиной дорожной одежды менее 60 см допускается осуществлять предварительную экспресс-оценку прочности дорожной одежды по результатам визуальной оценки состояния покрытия по вероятному значению коэффициента прочности $K_{пр}$, в зависимости от величины средневзвешенного балла, вычисляемого по формуле

$$K_{пр} = \frac{Б_{ср}}{10} + 0{,}5, \quad (Б.1)$$

где $Б_{ср}$ — величина средневзвешенного балла, определяемого по таблице Б.1.

В процессе визуальной оценки состояния покрытия дорогу делят на однотипные участки. Внутри каждого однотипного участка назначают частные микроучастки с одинаковым состоянием дорожной одежды (с однотипными видами дефектов).

На каждом однотипном участке в камеральных условиях вычисляют средневзвешенный балл оценки повреждений дорожного покрытия $Б_{ср}$ по формуле

$$Б_{ср} = \frac{Б_1 \cdot l_1 + Б_2 \cdot l_2 + \ldots + Б_n \cdot l_n}{l_1 \cdot l_2 + \ldots + l_n}, \quad (Б.2)$$

где $Б_n$ и l_n — соответственно балл (таблица Б.1) и протяженность частных микроучастков каждой полосы с практически одинаковым состоянием дорожной одежды в баллах;

n — количество частных микроучастков в составе однотипного участка.

Таблица Б.1 — Балльная оценка повреждений дорожного покрытия

Вид дефекта	Оценка в баллах
Без дефектов и поперечные одиночные трещины на расстоянии более 40 м (для переходных покрытий — отсутствие дефектов)	5,0
Поперечные одиночные трещины (для переходных покрытий — отдельные выбоины) на расстоянии 20 — 40 м между трещинами	4,9
Поперечные одиночные трещины (для переходных покрытий — отдельные выбоины) на расстоянии 10 — 20 м между трещинами	4,6
Поперечные редкие трещины (для переходных покрытий — выбоины) на расстоянии 8 — 10 м	4,3
Поперечные редкие трещины на расстоянии 6 — 8 м	3,9 (3,5)
Поперечные редкие трещины на расстоянии 4 — 6 м	3,6 (2,5)
Поперечные частые трещины на расстоянии между соседними трещинами 3 — 4 м	3,2
Поперечные частые трещины на расстоянии 2 — 3 м	2,9
Поперечные частые трещины на расстоянии 1 — 2 м	2,6
Продольная центральная трещина	4,5
Продольные боковые трещины	3,5
Одиночная сетка трещин на площади до 10 м^2 с крупными ячейками (сторона ячейки — более 0,5 м)	3,0
Одиночная сетка трещин на площади до 10 м^2 с мелкими ячейками (сторона ячейки — менее 0,5 м)	2,5
Густая сетка трещин на площади до 10 м^2	2,0
Сетка трещин на площади более 10 м^2 при относительной площади, занимаемой сеткой, 10 % — 30 %	2,3
Сетка трещин на площади более 10 м^2 при относительной площади, занимаемой сеткой, 30 % — 60 %	1,9
Сетка трещин на площади более 10 м^2 при относительной площади, занимаемой сеткой, 60 % — 90 %	1,6
Просадки (пучины) при относительной площади просадок 10 % — 20 %	1,2
Просадки (пучины) при относительной площади просадок 20 % — 50 %	0,9
Просадки (пучины) при относительной площади просадок более 50 %	0,5
Проломы дорожной одежды (вскрывшиеся пучины) при относительной площади, занимаемой проломами, 5 % — 10 %	1,2
Проломы дорожной одежды (вскрывшиеся пучины) при относительной площади, занимаемой проломами, 10 % — 30 %	0,9
Проломы дорожной одежды (вскрывшиеся пучины) при относительной площади, занимаемой проломами, более 30 %	0,5
Продольные боковые трещины	3,5
Одиночные выбоины на покрытиях, содержащих органическое вяжущее (расстояние между выбоинами более 20 м)	4,5
Отдельные выбоины на покрытиях, содержащих органическое вяжущее (расстояние между выбоинами 10 — 20 м)	3,5
Редкие выбоины на покрытиях, содержащих органическое вяжущее (расстояние 4 — 10 м)	2,7
Частые выбоины на покрытиях, содержащих органическое вяжущее (расстояние 1 — 4 м)	2,2
Карты заделанных выбоин, залитые трещины	3,0
Поперечные волны, сдвиги	2,4
Примечание — В скобках приведена оценка дефекта для дорожных одежд переходного типа.	

Приложение В
(обязательное)

Основные уравнения математической модели для определения модулей упругости отдельных конструктивных слоев

В.1 Ограничения

Математическая модель динамического деформирования дорожной конструкции на грунтовом основании, приведенная в настоящем стандарте, предполагает следующие условия и ограничения:

- среда является сплошным деформируемым твердым телом;
- область, занимаемая средой, представляет собой многослойное полупространство с плоскопараллельными границами раздела;
- многослойное полупространство содержит от двух до пяти слоев;
- материал среды в пределах каждого слоя является однородным;
- деформации среды являются малыми;
- соотношения между напряжениями и деформациями — линейные;
- все материалы являются изотропными;
- деформация среды предполагается осесимметричной;
- отсутствуют изменения свойств материалов в результате накопления повреждений или старения;
- отсутствуют процессы тепло- и влагопереноса;
- динамическое возбуждение среды осуществляется распределенными в ограниченной области на поверхности среды нормальными усилиями с ограниченным по времени импульсом.

В.2 Основные уравнения динамического деформирования многослойного полупространства при ударном воздействии

Уравнения движения для каждого слоя конструкции для изотропной среды представлены в форме уравнений Ламе:

$$(\lambda + 2\mu)\,\mathrm{grad\ div}\,\bar{u}(\bar{r},t) - \mu\,\mathrm{rot\ rot}\,\bar{u}(\bar{r},t) = \rho\,\partial^2\bar{u}(\bar{r},t)/\partial t^2, \quad (В.1)$$

где $\bar{u}(\bar{r}, t) = \{u_R, u_z\}^*$ — вектор перемещений в точке с координатами $\bar{r} = (R, z)$, определяемый радиальной u_R в плоскости, параллельной границам раздела слоев, и вертикальной u_z составляющими.

Примечание — «*» обозначает операцию транспонирования матрицы векторов перемещений $\{u_R, u_z\}$;

ρ — плотность среды;

λ, μ — коэффициенты Ламе, выражаемые через модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν соотношениями:

$$\lambda = (\nu E)/(1+\nu), \quad (В.2)$$

$$\mu = E/(2(1+\nu)). \quad (В.3)$$

Для вычисления напряжений и деформаций в среде используют соотношения линейного закона Гука.

В.3 Основные уравнения динамического деформирования многослойного полупространства при ударном воздействии

В начальный момент времени считается, что все точки конструкции находятся в состоянии покоя [формулы (В.4), (В.5)]:

$$\bar{u}(\bar{r},t)\,|_{t\le 0} = 0, \quad (В.4)$$

$$\partial\bar{u}(\bar{r},t)/\partial t\,|_{t\le 0} = 0. \quad (В.5)$$

На поверхности конструкции в круге радиуса R_0 заданы равно-распределенные вертикальные усилия с ограниченным временным импульсом $p(t)$ [$(p(t)\equiv 0$ при $t > t_{имп}$, $t_{имп}$ — продолжительность импульса] [формулы (В.6), (В.7)]:

$$\sigma_z(\bar{r},t)\big|_{Z=H} = \sigma_0 p(t), \quad (В.6)$$

$$\tau_{ZR}(\bar{r},t)\big|_{Z=H}=0, \tag{В.7}$$

где H — общая толщина дорожной одежды [в формулах (В.6), (В.7) соответствует вертикальной координате поверхности по Z].

Форма временного импульса предполагается синусоидальной [формула (В.8)]

$$p(t)=\begin{cases}\sin\left(\dfrac{\pi t}{t_{имп}}\right), & t\in\left[0,t_{имп}\right]\\ 0, & t\notin\left[0,t_{имп}\right]\end{cases}; \tag{В.8}$$

σ_0 — расчетное давление на покрытие дорожной одежды, соответствующее показаниям силоизмерителя установки ударного нагружения.

В.4 Условия сопряжения слоев

На горизонтальных границах раздела слоев конструкции задаются условия жесткого сцепления с требованием непрерывности компонент векторов перемещений $\bar{u}(\bar{r}, t)$ и напряжений

$$\bar{q}(\bar{r},t)=\left\{\sigma_z(\bar{r},t),\ \tau_{ZR}(\bar{r},t)\right\}^* \tag{В.9}$$

при переходе через границу в любой момент времени t. Вектор напряжений $\bar{q}(\bar{r}, t)$ вводят в качестве граничного условия, замыкающего систему линейных алгебраических уравнений, при построении решения для многослойной среды. Он подразумевает, что полученные в ходе решения систем уравнения функции должны удовлетворять условию равенства нормальных и касательных напряжений на границах контактирующих слоев.

В условиях ослабления конструкции на некоторых границах раздела слоев возможно задание однородных (на всей границе) условий гладкого контакта, определяющих непрерывность вертикальных перемещений $u_z(\bar{r}, t)$ и напряжений $\sigma_z(\bar{r}, t)$ при переходе через границу и отсутствие касательных напряжений вдоль нее

$$\tau_{ZR}(\bar{r},t)=0. \tag{В.10}$$

В.5 Методика решения начально-краевой задачи

Для решения начально-краевой задачи согласно В.1—В.3 используют метод гармонического анализа, позволяющий представить основные временные характеристики НДС точек среды в форме интегралов Фурье по частоте ω по формуле

$$f(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}F(\omega)\exp(-i\omega t)d\omega, \tag{В.11}$$

где $F(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\exp(i\omega t)dt$ — преобразование Фурье или спектральная плотность нестационарного сигнала $f(t)$;

ω — круговая частота колебаний, рад/с.

Преобразованные по Фурье уравнения по В.1 для i-й компоненты многослойного полупространства с материальными свойствами λ_j, μ_j, ρ_j принимают вид формулы

$$\operatorname{grad}\operatorname{div}\bar{U}^{(j)}(\bar{r})-\frac{\theta_{j1}^2}{\theta_{j2}^2}\operatorname{rot}\operatorname{rot}\bar{U}^{(j)}(\bar{r})+\theta_{j1}^2\bar{U}^{(j)}(\bar{r})=0, \tag{В.12}$$

где $\bar{U}^{(j)}(\bar{r})=\left\{U_R^{(j)}(R,z),U_z^{(j)}(R,z)\right\}^*$ — преобразование Фурье вектора перемещений;

$\theta_{j1}^2=\omega^2R_0^2/V_{Pj}^2$, $\theta_{j2}^2=\omega^2R_0^2/V_{Sj}^2$ — приведенные частоты колебаний.

Скорости распространения продольных и поперечных волн в *j*-й среде вычисляют по формулам:

$$V_{Pj} = \sqrt{\left(\lambda_j + 2\mu_j\right)/\rho_j}, \tag{В.13}$$

$$V_{Sj} = \sqrt{\mu_j/\rho_j}. \tag{В.14}$$

На поверхности среды граничные условия приобретают вид формул:

$$\sigma_z(\bar{r},\omega)|_{Z=H} = \sigma_0 P(\omega), \tag{В.15}$$

$$\tau_{ZR}(\bar{r},\omega)|_{Z=H} = 0, \tag{В.16}$$

где $P(\omega)$ — спектральная плотность импульса нагрузки, вычисляемая по формуле:

$$P(\omega) = \frac{\pi t_{имп}}{\pi^2 - \omega^2 t_{имп}^2}\left(1 + e^{i\omega t_{имп}}\right). \tag{В.17}$$

Для $p(t)$ — по формуле (В.8).

Дальнейшие выкладки целесообразно осуществлять в матричной форме в силу возможности их более простой реализации в программном виде и применимости для параллельных вычислений в случае построения решения для многослойного полупространства.

В.6 Решение краевой задачи для однородного полупространства

Базовым решением для построения функций перемещений и напряжений в многослойном полупространстве лежит решение краевой задачи для однородного полупространства D_1 о действии осциллирующей с частотой ω нагрузки, распределенной в ограниченной области Ω на его поверхности.

В соответствии с представлением Ламе амплитудные функции перемещений точек области D_1 записывают в виде формулы:

$$\bar{U}^{(1)}(\bar{r}) = \left\{U_R^{(1)}, U_z^{(1)}\right\}^* = \nabla\varphi^{(1)} + \nabla\cdot\left(\psi^{(1)}\boldsymbol{e}_\theta\right), \tag{В.18}$$

где ∇ — оператор Гамильтона.

Волновые потенциалы $\varphi^{(1)}$, $\psi^{(1)}$ удовлетворяют уравнениям Гельмгольца по формулам:

$$\Delta\varphi^{(1)} + \theta_{11}^2\varphi^{(1)} = 0, \tag{В.19}$$

$$\Delta\psi^{(1)} + \theta_{12}^2\psi^{(1)} = 0. \tag{В.20}$$

Для представления решения для потенциалов, а также для компонент $\bar{U}^{(1)}(\bar{r})$ используют интегральное преобразование Ханкеля по формулам:

$$\bar{f}(u) = H_k[f(R)] = \int_0^\infty f(R)J_k(uR)R\,dR, \tag{В.21}$$

$$f(R) = H_k^{-1}\left[\bar{f}(u)\right] = \int_{\Gamma+}\bar{f}(u)J_k(uR)u\,du. \tag{В.22}$$

Значение индекса $k = 0$ отвечает вертикальной компоненте волновых полей, $k = 1$ — радиальной.

Контур Γ_+ при интегрировании в плоскости комплексного переменного u определен принципом предельного поглощения: обходит точки ветвления и полюс Рэлея подынтегральной функции снизу и имеет вид, представленный на рисунке В.1.

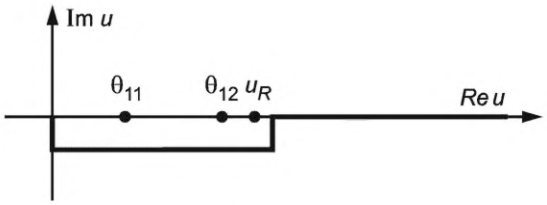


Рисунок В.1 — Вид контура

Волновые потенциалы для полупространства имеют вид:

$$\bar{\varphi}^{(1)} = C_1(u)\exp\left[\sigma_{11}z\right], \tag{В.23}$$

$$\bar{\psi}^{(1)} = C_2(u)\exp\left[\sigma_{12}z\right], \tag{В.24}$$

$$\sigma_{1j} = \sqrt{u^2 - \theta_{1j}^2}. \tag{В.25}$$

В результате подстановки формул (В.23), (В.24), (В.25) в формулу (В.18), применения закона Гука и граничных условий (В.15), (В.16) для определения неизвестных функций $C_j(u)$ соотношения для векторов перемещений $\bar{U}^{(1)}(\bar{r})$ и напряжений $\bar{Q}^{(1)}(\bar{r}) = \left\{\sigma_z(\bar{r}), \tau_{ZR}(\bar{r})\right\}^*$ представляют в виде формул:

$$\bar{U}^{(1)}(\bar{r}) = \frac{1}{\mu_j}\int_{\Gamma_+}\bar{P}^{(1)}(u,z)\cdot\bar{X}^{(1)}(u)J_k(uR)u\,du, \tag{В.26}$$

$$\bar{Q}^{(1)}(\bar{r}) = \int_{\Gamma_+}\bar{S}^{(1)}(u,z)\cdot\bar{X}^{(1)}(u)J_k(uR)u\,du, \tag{В.27}$$

где матрицы функций $\bar{P}^{(1)}(u, z)$, $\bar{S}^{(1)}(u, z)$ имеют следующий вид формул:

$$\bar{P}^{(1)}(u,z) = \bar{D}(u,z)\cdot\bar{B}^{-1}(u,0), \tag{В.28}$$

$$\bar{D}(u,z) = \begin{pmatrix} -u\exp\left(\sigma_{11}z\right) & -\sigma_{12}\exp(\sigma_{12}z) \\ \sigma_{11}\exp\left(\sigma_{11}z\right) & u\ \exp(\sigma_{12}z) \end{pmatrix}, \tag{В.29}$$

$$\bar{B}^{-1}(u,0) = \begin{pmatrix} \zeta_2^2 & 2u\sigma_{21} \\ -2u\sigma_{11} & -\zeta_2^2 \end{pmatrix}\Delta_R^{-1}, \tag{В.30}$$

$$\Delta_R = \zeta_2^4 - 4u^2\sigma_{11}\sigma_{12}, \tag{В.31}$$

$$\zeta_2^2 = u^2 + \sigma_{12}^2, \tag{В.32}$$

$$\bar{S}^{(1)}(u,z) = \bar{B}(u,z)\cdot\bar{B}^{-1}(u,0), \tag{В.33}$$

$$\bar{B}(u,z) = \begin{pmatrix} \zeta_2^2\exp\left(\sigma_{11}z\right) & 2u\sigma_{12}\exp(\sigma_{12}z) \\ -2u\sigma_{11}\exp\left(\sigma_{11}z\right) & -\zeta_2^2\exp(\sigma_{12}z) \end{pmatrix}, \tag{В.34}$$

где ζ — функция, зависящая от параметра преобразования Ханкеля;

$\bar{X}^{(1)}(u)$ — преобразование Фурье от импульса, вычисляемое по формуле

$$\bar{X}^{(1)}(u) = \sigma_0 P(\omega)\frac{J_1(uR_0)}{u}. \tag{В.35}$$

В случае рассмотрения многослойной среды $\bar{X}^{(1)}(u)$ является неизвестным.

В.7 Решение краевой задачи для слоя

Как составная часть общего решения рассматривается построение решения краевой задачи для однородного слоя.

Пусть на гранях j-го слоя D_j, описываемого в локальной системе координат (R, z) соотношениями: $D_j = \{R\in(0, +\infty), z\in (0, h_j)\}$, заданы векторы напряжений по формулам:

$$\bar{Q}^{(j)}(R,0) = \left\{\sigma_z(R,0), \tau_{ZR}(R,0)\right\}^* = \bar{Y}^{(j,1)}(R), \tag{В.36}$$

$$\bar{Q}^{(j)}\left(R,h_j\right) = \left\{\sigma_z\left(R,h_j\right),\ \tau_{ZR}(R,h_j)\right\}^* = \bar{Y}^{(j,2)}(R), \tag{В.37}$$

$$R\in(0,+\infty). \tag{В.38}$$

Функции $\bar{U}^{(j)}(\bar{r})$, удовлетворяющие уравнениям движения, согласно предлагаемому методу представляют в виде формулы:

$$\bar{U}^{(j)}(\bar{r}) = \bar{U}^{(j,1)}(\bar{r}) + \bar{U}^{(j,2)}(\bar{r}), \tag{В.39}$$

где слагаемые $\bar{U}^{(j,n)}(\bar{r})$, n = 1,2, данного представления являются решениями уравнений Ламе для однородного полупространства с удовлетворением граничных условий по рисунку В.2:

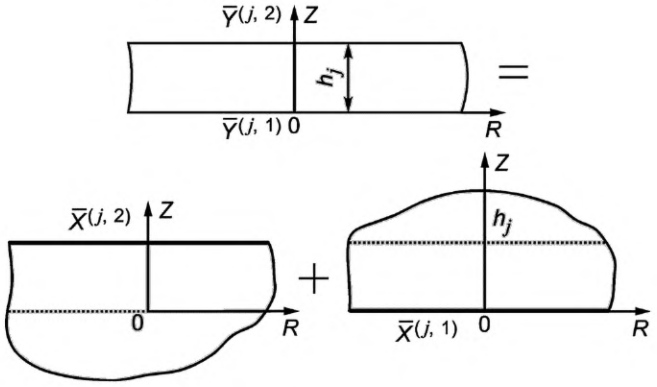


Рисунок В.2 — Представление решения для слоя

$\bar{Q}^{(j,\ 1)}(R,0) = \bar{X}^{(j,1)}(R)$ — для первого полупространства $z > 0$,

$\bar{Q}^{(j,2)}\left(R,h_j\right) = \bar{X}^{(j,2)}(R)$ — для второго $z < h_j$.

Векторы перемещений $\bar{U}^{(j,n)}(\bar{r})$, n = 1,2, и напряжений $\bar{Q}^{(j,n)}(\bar{r})$ получены из формул (В.26), (В.27) в формулы (В.40)—(В.43) путем замены соответствующих переменных z и упругих параметров полупространства ρ, E, ν на параметры соответствующего j-го слоя [формулы (В.40)—(В.45)]. Переход от образов Ханкеля к оригиналам осуществляется путем интегрирования формулы (В.23). Интегрирование осуществляется в комплексной плоскости с применением принципа предельного поглощения.

$$\bar{U}^{(j,n)}(\bar{r}) = \frac{1}{\mu_j}\int_{\Gamma_+}\bar{P}^{(j,n)}(u,z)\cdot\bar{X}^{(j,n)}(u)J_k(uR)u\,du, \tag{В.40}$$

$$\bar{Q}^{(j,n)}(\bar{r}) = \int_{\Gamma_+}\bar{S}^{(j,n)}(u,z)\cdot\bar{X}^{(j,n)}(u)J_k(uR)u\,du, \tag{В.41}$$

$$\bar{P}^{(j,2)}(u,z) = \bar{P}^{(1)}(u,z-h_j), \tag{В.42}$$

$$\bar{S}^{(j,2)}(u,z) = \bar{S}^{(1)}(u,z-h_j), \tag{В.43}$$

$$P^{(j,1)}_{lm}(u,z) = P^{(1)}_{lm}(u,-z)(-1)^{\delta_{lm}}, \tag{В.44}$$

$$S_{lm}^{(j,1)}(u,z) = S_{lm}^{(1)}(u,-z)(-1)^{\delta_{lm}+1}, \quad \text{(В.45)}$$

где l, m =1,2;

δ_{lm} — символ Кронекера.

Функции $\bar{X}^{(j,n)}(u)$ в формуле (В.40) являются неизвестными. Их определение осуществляется из граничных условий (В.36)—(В.38), записанных в форме системы уравнений в пространстве преобразований Ханкеля [формулы (В.44), (В.45)]:

$$\bar{X}^{(j,1)}(u) + \bar{S}^{(j,2)}(u,0)\cdot\bar{X}^{(j,2)}(u) = \bar{Y}^{(j,1)}(u), \quad \text{(В.46)}$$

$$\bar{S}^{(j,1)}\left(u,h_j\right)\cdot\bar{X}^{(j,1)}(u) + \bar{X}^{(j,2)}(u) = \bar{Y}^{(j,2)}(u). \quad \text{(В.47)}$$

Определитель системы (В.46), (В.47) обращается в ноль в точках u_k, соответствующих волновым числам волн Релея-Лэмба. Данные нули должны обходиться контуром Γ_+ в соответствии с принципом предельного поглощения, как показано на рисунке В.1.

В.8 Построение решения для многослойной структуры

Основой построения решения для многослойного полупространства являются интегральные представления решения в каждой компоненте слоистой структуры видов (В.27), (В.28), (В.29), (В.30), (В.31), (В.32). Введенные в них трансформанты Ханкеля вспомогательных функций напряжений на границах раздела сред $\bar{X}^{(j,n)}(u)$ являются неизвестными и должны быть определены из граничных условий исходной краевой задачи и условий стыковки разнородных составляющих слоистого полупространства между собой.

Равенство векторов напряжений на границах $z = z_j$, j = 1, 2,..., N – 1, $\bar{Y}^{(j,2)}(u) = \bar{Y}^{(j+1,1)}(u)$ приводит к первой группе линейных алгебраических уравнений вида:

$$\bar{S}^{(j,1)}\left(u,h_j\right)\cdot\bar{X}^{(j,1)}(u) + \bar{X}^{(j,2)}(u) = \bar{X}^{(j+1,1)}(u) + \bar{S}^{(j+1,2)}(u,0)\cdot\bar{X}^{(j+1,2)}(u). \quad \text{(В.48)}$$

Удовлетворяя далее равенствам компонент векторов перемещений в трансформантах Ханкеля при переходе через границы раздела $\bar{U}^{(j)}(u, h_j) = \bar{U}^{(j+1)}(u,0)$, получим вторую группу линейных алгебраических уравнений:

$$\frac{1}{\mu_j}\sum_{n=1}^{2}\bar{P}^{(j,n)}\left(u,h_j\right)\cdot\bar{X}^{(j,n)}(u) = \frac{1}{\mu_{j+1}}\sum_{n=1}^{2}\bar{P}^{(j+1,n)}(u,0)\cdot\bar{X}^{(j+1,n)}(u). \quad \text{(В.49)}$$

Замыкает систему следующее уравнение по напряжениям на дневной поверхности среды

$$\bar{S}^{(N,1)}\left(u,h_N\right)\cdot\bar{X}^{(N,1)}(u) + \bar{X}^{(N,2)}(u) = \left\{\sigma_0 P(\omega)\frac{J_1\left(uR_0\right)}{u},\ 0\right\}^*. \quad \text{(В.50)}$$

Таким образом, система линейных алгебраических уравнений (В.48)—(В.50) является системой $4N$—2 уравнений с $4N$—2 неизвестными $\bar{X}_k^{(j,n)}(u)$, $\bar{X}_k^{(1)}(u)$, j = 2,..., N, k, n = 1, 2 [формула (В.51)]:

$$\bar{A}(u)\cdot\bar{X}(u) = \bar{b}(u). \quad \text{(В.51)}$$

Определитель системы (В.51) $\Delta(u)$ обращается в ноль в точках $u = u_k$, соответствующих корням дисперсионного уравнения для N-слойного полупространства и определяющих волновые чисел, распространяющихся на поверхности и границах раздела слоев поверхностных и каналовых волн. Матрица полученной системы имеет блочно-диагональный вид, хорошо обусловлена на Γ_+. Форма матрицы системы (В.51), вид векторов неизвестных и свободных членов представлены в настоящем приложении для четырехслойного полупространства. При большем количестве слоев матрица добавляется блоками, соответствующими уравнениям стыковки сред согласно формулам (В.48), (В.49).

Важно, чтобы при наличии вещественных корней дисперсионного уравнения $\Delta(u) = 0$ контур Γ_+ обходил их снизу, а комплекснозначные корни не попадали внутрь его. В общем случае для параметров контура Γ_+ с целью получения устойчивых численных результатов достаточно выбрать следующие значения: длина контура $b = 1{,}2\max\limits_{1\le j\le N}\theta_s^{(j)}$,

глубина контура $g = \min\left\{0{,}2,\ 0{,}2\cdot\max\limits_{1\le j\le N}\theta_s^{(j)}\right\}$.

Важным шагом при учете динамичности воздействия нагрузки являются построение спектра ударного нагружения, возбуждаемого на поверхности дорожной конструкции, и выделения в нем характерных частот колебаний. В рамках данной методики определение характерных частот колебаний при ударном воздействии осуществляют по формуле

$$\omega_k = k\pi / (t + t_{зад}), \tag{В.52}$$

где t — время наблюдения за деформированием поверхности дорожной конструкции при ударном нагружении, выбираемое из условий затухания предыдущего импульса, с;

k — количество гармоник разложения, определяемое исходя из условий точности аппроксимации импульса $P(t)$;

$t_{зад}$ — время задержки, с.

Для заданных ωk путем контурного интегрирования рассчитываются амплитудно-частотные характеристики перемещений для заданных точек наблюдения в соответствии с обратным преобразованием Ханкеля:

$$\bar{U}^{(j,N)}(\bar{R},\omega) = \int_{\Gamma_+} J_k(uR) \sum_{n=1}^{2} \bar{P}^{(j,n)}(u,z) \cdot \bar{X}^{(j,n)}(u)\, u\, du. \tag{В.53}$$

Для выявления максимальных значений вертикальных перемещений среды проводят их анализ во временной области с построением амплитудно-временной характеристики перемещений $\bar{U}^{(N)}(\bar{R}, t)$. Расчет амплитудно-временной характеристики перемещений в заданных точках на поверхности покрытия осуществляют по формуле

$$\bar{U}^{(N)}(\bar{R},t) = \sum_{k=1}^{M} P_k \left\{ -\cos\eta_k Im\left[\bar{U}^N(\bar{R},\omega_k)\exp(-i\omega_k t)\right] + \sin\eta_k Re\left[\bar{U}^N(\bar{R},\omega_k)\exp(-i\omega_k t)\right]\right\}, \tag{В.54}$$

для всех точек наблюдения на поверхности многослойного полупространства,
где коэффициенты P_k — полученные коэффициенты ряда Фурье разложения импульса ударного нагружения $P(t)$, вычисляемые по формуле

$$P_k = \int_0^t \sin(\omega_k t + \eta_k) P(t)\, dt, \tag{В.55}$$

$Re(\bar{U}^{(N)}(\bar{R},\omega_k))$, $Im(\bar{U}^{(N)}(\bar{R},\omega_k))$ — действительная и мнимая части вектора вертикальных перемещений на заданных частотах ω_k.

В.9 Решение обратной задачи по восстановлению модулей упругости слоев конструкции

Определение модулей упругости для слоев дорожной конструкции и грунта E_j, j = 1, 2, ..., N основывается на сравнении значений вертикальных перемещений на поверхности дорожного покрытия, вычисленных по модели $u_z(\bar{r}),t)$ в точках $\bar{r}$ = (R_k, H), k = 1, 2,..., 10, и аналогичных значений перемещений, полученных экспериментально $u_{z_{эксп}}(R_k, t)$ с использованием установки динамического нагружения.

В качестве общей характеристики анализа, подлежащей сравнению, выбирают максимум модуля перемещений во времени (максимальный динамический прогиб), определяемый по формулам:

$$u_k(E_j) = \max_t \left| u_z((R_k,H),t) \right|, \tag{В.56}$$

$$u_{k\,эксп} = \max_t \left| u_{z\,эксп}(R_k,t) \right|. \tag{В.57}$$

Для нахождения E_j проводят процедуру минимизации квадратичной функции ошибки по формуле

$$F(E_j) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{10} (u_k(E_j) - u_{k\,эксп})^2. \tag{В.58}$$

Процедура минимизации может быть основана на методах Ньютона, градиентных методах или методах аппроксимации. Рекомендуется использование метода Левенберга-Марквардта как одного из наиболее эффектив-

ных методов решения задач о наименьших квадратах, предназначенного для минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от искомых переменных. В качестве искомых переменных при этом рассматриваются координаты расчетной чаши прогиба, а в качестве исходных, относительно которых ведется минимизация, — координаты фактической чаши прогиба. Данный метод отличает его наилучшая применимость к функции вида (В.58).

В качестве начального приближения модулей упругости рекомендуется выбирать проектные значения модулей для рассматриваемого участка автомобильной дороги.

Вычисление матрицы Якоби оптимально проводить на основе разностной формулы первого порядка

$$\frac{\partial u_k}{\partial E_j} \approx \frac{u_k(E_j + \Delta E_j - u_k(E_j - \Delta E_j)}{2\Delta E_j}, \quad \text{(В.59)}$$

где величина шага по переменной E_j соизмерима с точностью определения данной переменной, доставляющей минимум функции ошибки.

Для устойчивости расчетов следует ограничить область изменения каждого из модулей слоев конструкции и грунта исходя из возможных физических границ расположения модулей упругости соответствующих материалов:

$$E_j \in \left[E_{jL}, E_{jH}\right]. \quad \text{(В.60)}$$

Общая поэтапная схема решения задачи по определению фактических модулей упругости конструктивных слоев дорожной одежды приведена на рисунке В.3.

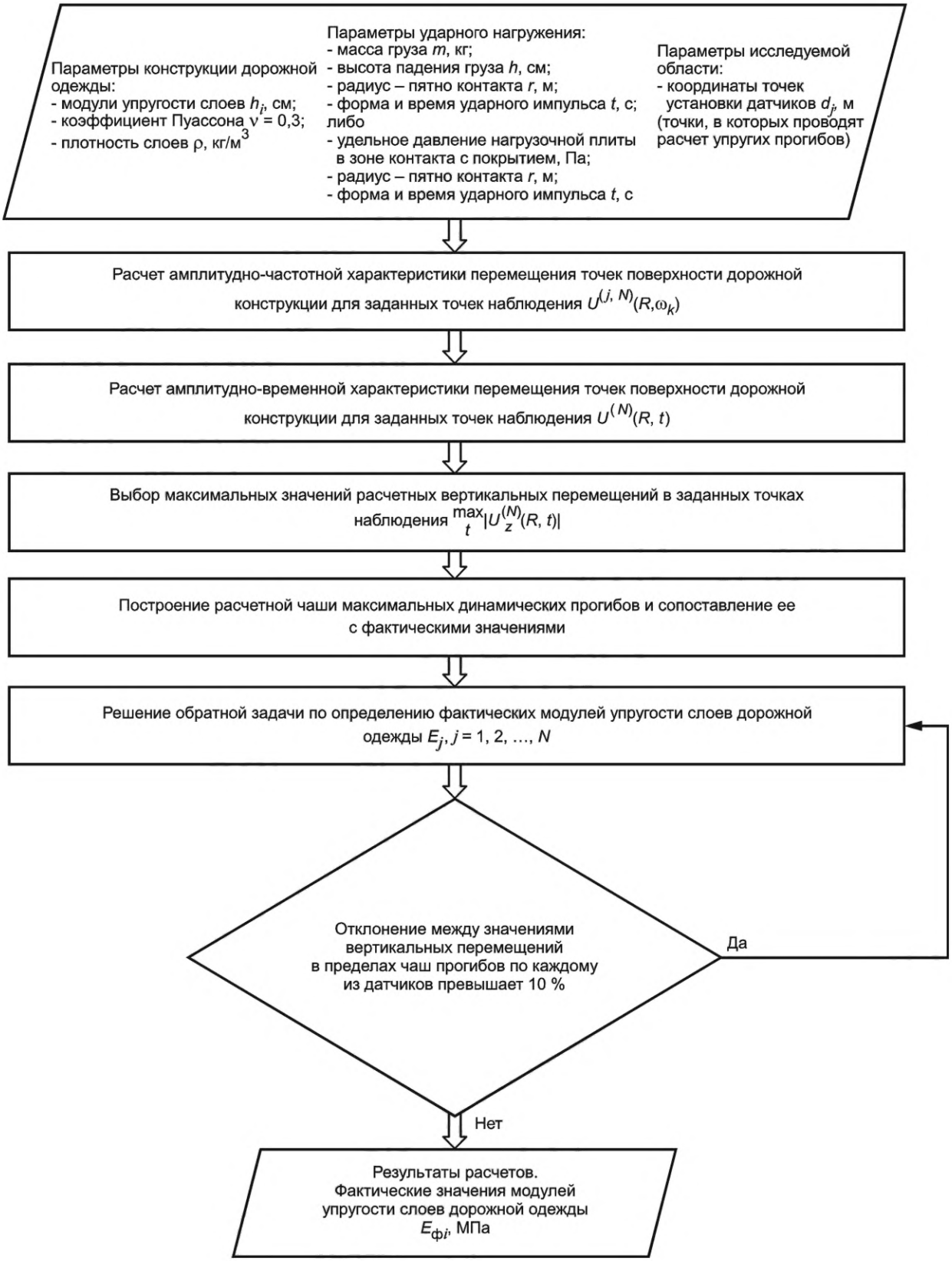


Рисунок В.3 — Поэтапная схема решения задачи об определении фактических модулей упругости конструктивных слоев

Модули упругости материалов слоев и плотности принимают по проектной документации либо по нормативным документам по проектированию, действующим на момент проектирования дорожной одежды.

Итоговые фактические значения модулей упругости конструктивных слоев дорожных одежд, определенные по результатам расчета, должны соответствовать следующим диапазонам значений, представленным в таблице В.1.

Таблица В.1 — Допустимые диапазоны изменения фактических модулей упругости конструктивных слоев дорожных одежд

Тип конструктивного слоя	Допустимый диапазон модулей упругости, МПа
Асфальтобетон	500 — 15 000
Основание, обработанное вяжущим	200 — 5000
Основание, не обработанное вяжущим	80 — 1000
Дополнительные слои основания	50 — 300
Грунт земляного полотна	20 — 150

Приложение Г
(справочное)

Примеры оценки прочности дорожной одежды и модулей упругости отдельных конструктивных слоев

Г.1 Пример 1. Оценка прочности дорожной одежды по общему модулю упругости и оценка прочности конструктивных слоев дорожной одежды на этапе эксплуатации

Г.1.1 Исходные данные:

а) наименование автомобильной дороги — М4 «Дон» км 860 — 877;

б) категория участка автомобильной дороги — IБ;

в) количество полос движения — 4 (по две в каждом направлении);

г) тип дорожной одежды — капитального типа, с асфальтобетонным покрытием;

д) конструкция дорожной одежды на стадии рабочей документации:

1) грунт рабочего слоя — суглинок;

2) щебень фракционированный марки 800, фракции 40 — 70 мм с заклинкой фракционированным мелким щебнем, толщиной 45 см;

3) щебеночно-песчано-цементная смесь М60, толщиной 20 см;

4) асфальтобетон пористый из горячей крупнозернистой щебеночной смеси марки II, толщиной 8 см;

5) асфальтобетон пористый из горячей крупнозернистой щебеночной смеси марки I, толщиной 7 см;

6) щебеночно-мастичный асфальтобетон из смеси ЩМА 15, толщиной 5 см.

е) расчетная нагрузка — 115 кН;

ж) расчетный модуль упругости дорожной конструкции — 510 МПа;

и) диаметр нагрузочной плиты — 30 см;

к) фактическая температура асфальтобетона на глубине 5 см — 15 °С;

л) результаты замера фактической чаши прогиба.

Измерения установкой динамического нагружения осуществляют в прямом и обратном направлениях движения по крайним правым полосам.

В качестве примера рассмотрены задачи определения прочности на одной из точек на данном участке эксплуатируемой автомобильной дороги.

Результаты замера фактической чаши прогибов представлены в таблице Г.1;

Таблица Г.1 — Результаты замера фактической чаши прогибов

Измеритель прогиба	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
Расстояние от центра приложения нагрузки, мм	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Среднее значение прогиба в серии, мкм	297,1	240,8	215,7	185,1	162,1	129,8	102,8	82,3	70,8	58,2

м) результаты предварительной диагностики.

По результатам предварительной диагностики на основе визуальной оценки обнаружено наличие дефектов на покрытии дорожной одежды участка автомобильной дороги: сетка трещин; неровности, связанные с ямочным ремонтом; поперечные трещины; продольные боковые трещины.

Проектные толщины конструктивных слоев подтверждены предварительным обследованием в соответствии с ГОСТ Р 58349 и [2]. Примеры выполнения работ по определению толщины слоев дорожной одежды с помощью георадара представлены в приложении Ж [2].

Г.1.2 Оценка прочности дорожной одежды по общему модулю упругости

Г.1.2.1 По формуле (1) приводят фактическое значение прогиба к расчетной температуре 10 °С:

$$l^{д0}_{T=10} = l_{tф}(-0,055 * \ln(h) + 1,3563) \cdot 2,72^{\left((0,004 \ln(h) - 0,0293) \cdot T_ф\right)} =$$

$$= 0,297(-0,055 * \ln(20) + 1,3563) \cdot 2,72^{\left((0,004 \ln(20) - 0,0293) \cdot 15\right)} = 0,273 \text{ мм}, \quad (Г.1)$$

где $l^{д0}_{T=10}$ — значение прогиба при расчетной температуре 10 °С, мм;

h — толщина асфальтобетонных слоев, см;

$T_ф$ — фактическая температура асфальтобетона при выполнении измерений, °С.

Г.1.2.2 По формуле (2) приводят динамический упругий прогиб в центре приложения нагрузки к расчетному времени приложения нагрузки:

$$l^{ст}_{T=10} = \left(0,3\frac{h}{h_1} + 1,1\right) l^{д}_{T=10} = \left(0,3 \cdot \frac{20}{10} + 1,1\right) \cdot 0,273 = 0,464 \text{ мм}, \quad (Г.2)$$

где h — фактическая толщина пакета слоев из асфальтобетона, см;

h_1 — толщина слоев из асфальтобетона, равная 10 см;

$l^{ст}_{T=10}$ — статический упругий прогиб в центре приложения нагрузки, мм;

$l^{д}_{T=10}$ — динамический упругий прогиб в центре приложения нагрузки, мм.

Г.1.2.3 По формуле (3) рассчитывают фактический модуль упругости $E_ф$:

$$E_ф = \frac{p \cdot D}{l^{ст}_{T=10}} \cdot \left(1 - \nu^2\right) = \frac{0,81 \cdot 300}{0,464} \cdot \left(1 - 0,3^2\right) = 476 \text{ МПа}, \quad (Г.3)$$

где p — удельное давление нагрузочной плиты в зоне контакта с покрытием, МПа;

D — диаметр нагрузочной плиты, мм;

ν — коэффициент Пуассона, принимаемый равным 0,3;

$l^{ст}_{T=10}$ — значение статического прогиба при расчетной температуре 10 °С, мм.

Г.1.2.4 Определение коэффициента прочности дорожной одежды

Коэффициент прочности дорожной одежды вычисляют по формуле (5)

$$K_{пр} = \frac{E_ф}{E_{расч}} = \frac{476}{510} = 0,93. \quad (Г.4)$$

Г.1.3 Оценка прочности конструктивных слоев дорожной одежды на этапе эксплуатации

Г.1.3.1 Определение проектных модулей упругости материалов конструктивных слоев

Для определения модулей упругости отдельных конструктивных слоев дорожная одежда представлена в виде трехслойной системы, расположенной на поверхности упругого полупространства, представляющего собой грунт земляного полотна.

Для дальнейших расчетов назначают проектные нормативные значения модулей упругости материалов конструктивных слоев дорожной одежды в соответствии с действующими на момент проектирования нормативными документами.

Средневзвешенные значения модуля упругости для пакета слоев асфальтобетона и основания дорожной конструкции рассчитывают по формуле (6). Конструкция дорожной одежды, используемая при расчете, представлена в таблице Г.2.

Таблица Г.2 — Конструкция дорожной одежды на участке автомобильной дороги

Наименование конструктивного элемента	Толщина слоя, см	Проектное значение модуля упругости слоя, МПа
Асфальтобетон	20	1800
Щебеночно-песчано-цементная смесь М60	20	800
Щебень фракционированный марки 800, фракции 40 — 70 мм	45	350
Грунт земляного полотна	Любая	41

Г.1.3.2 Порядок определения модулей упругости слоев дорожных одежд включает в себя следующие шаги:

- внесение исходных данных о конструкции дорожной одежды;
- построение расчетного импульса нагружения, характерного для установки динамического нагружения;
- построение амплитудно-частотной и амплитудно-временной характеристик перемещений на поверхности покрытия дорожной одежды;
- построение расчетной чаши прогибов поверхности дорожной конструкции при начальных значениях модулей упругости;
- выполнение корректировки расчетной чаши прогибов относительно фактической с одновременным подбором значений модулей упругости слоев дорожной конструкции;
- вывод графика определения модулей упругости конструктивных слоев дорожной одежды.

Г.1.3.3 Процедура определения модулей упругости конструктивных слоев дорожной одежды

Методика построения расчетной чаши прогибов с использованием математической модели представлена в приложении В настоящего стандарта. Расчет чаши прогибов осуществляют в точках с координатами, соответствующими координатам точек установки измерителей прогиба при экспериментальном нагружении.

Для рассматриваемых выше расчетной и фактической чаш упругих прогибов по таблице Г.1 вид до проведения процедуры корректировки представлен на рисунке Г.1.

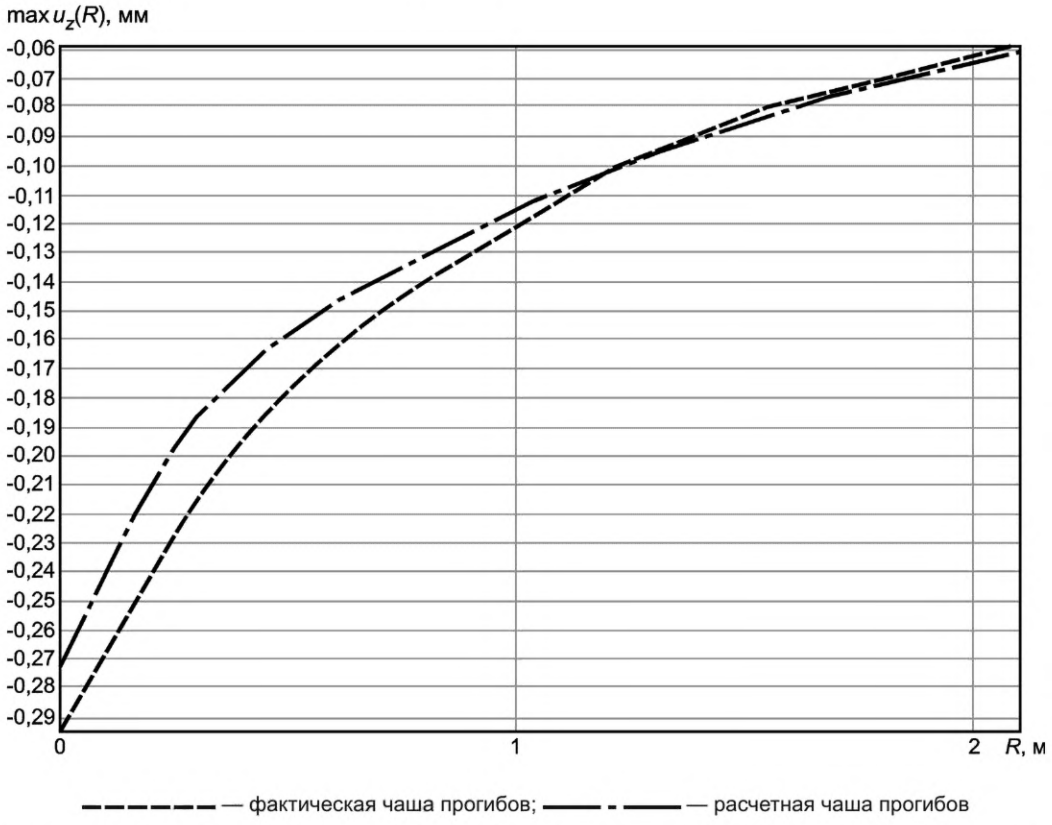


Рисунок Г.1 — Расчетная чаша прогибов, построенная с использованием математической модели, и фактическая чаша прогибов, построенная по результатам измерений

Алгоритм корректировки расчетной и фактической чаш прогибов представлен в приложении В. Для рассматриваемых чаш упругих прогибов вид после проведения процедуры корректировки представлен на рисунке Г.2.

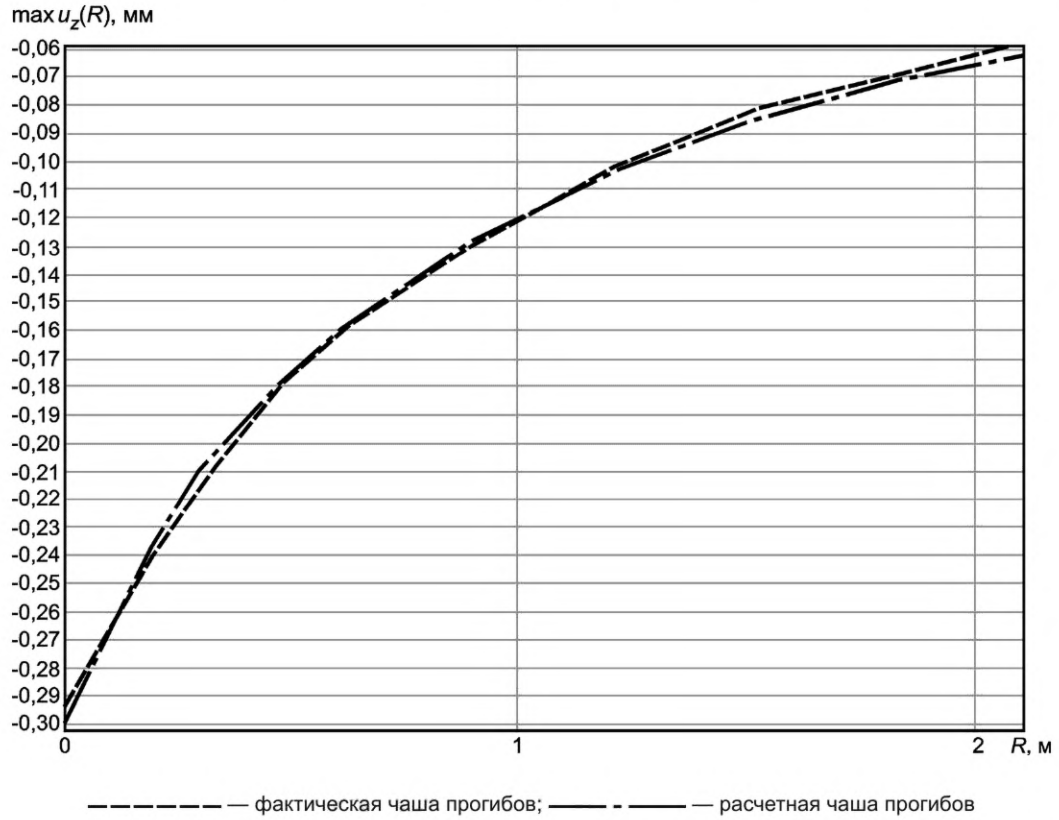


Рисунок Г.2 — Расчетная чаша прогибов, построенная с использованием математической модели, и фактическая чаша прогибов, построенная по результатам измерений на точке 0 после корректировки

Результаты определения эксплуатационных значений модулей упругости слоев дорожной одежды по итогам корректировки приведены в таблице Г.3.

Таблица Г.3 — Результаты расчета модулей упругости конструктивных слоев дорожной одежды

Наименование конструктивного элемента	Толщина слоя, см	Значение модуля упругости слоя после корректировки, МПа
Асфальтобетон	20	1943
Щебеночно-песчано-цементная смесь М60	20	881
Щебень фракционированный марки 800, фракции 40 — 70 мм	45	200
Грунт земляного полотна	Безразмерная, не ограничена снизу	71

Полученные значения модулей упругости соответствуют фактической температуре проведения измерений (T = 15 °С) и времени действия импульса установки динамического нагружения, равного 0,02 — 0,03 с. Для принятия решений о необходимости/отсутствии необходимости проведения ремонтных мероприятий на обследованном участке необходимо приведение полученных результатов к расчетному времени приложения нагрузки (продолжительности импульса 0,1 с).

Данные упругих прогибов, замеренных при фактической температуре и приведенных к расчетной температуре для каждого из измерителя прогиба установки, приведены в таблице Г.4.

Таблица Г.4 — Фактическая чаша прогибов, приведенная к расчетной температуре

Измеритель прогиба	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
Скорректированный прогиб, мкм	273,0	226,6	203,5	176,4	155,6	126,5	101,3	80,9	69,7	58,3

Расчет модулей упругости конструктивных слоев дорожной одежды и грунта рабочего слоя выполняют с учетом скорректированной чаши упругих прогибов. Для рассматриваемых выше расчетной и фактической чаш упругих прогибов вид до проведения процедуры корректировки с учетом приведения к расчетной температуре представлен на рисунке Г.3.

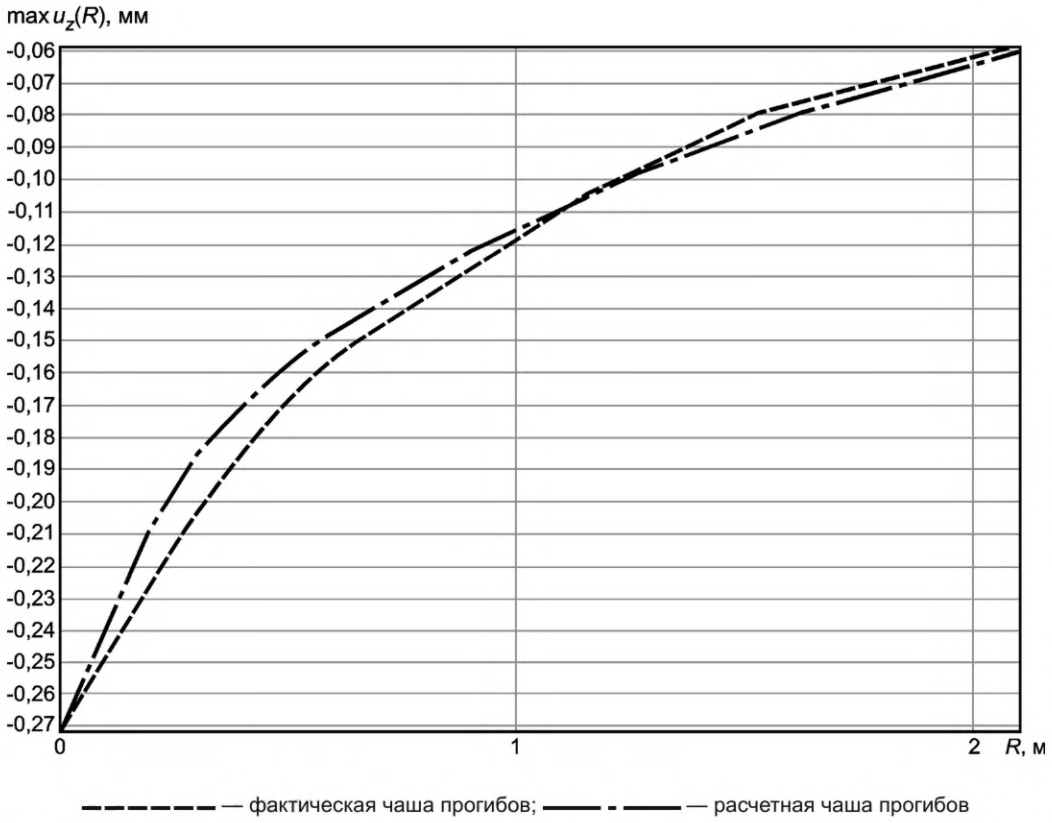


Рисунок Г.3 — Расчетная чаша прогибов, построенная с использованием математической модели, и фактическая чаша прогибов, построенная по результатам измерений

Алгоритм корректировки расчетной и фактической чаш прогибов принимают в соответствии с приложением В. Для рассматриваемых выше чаш упругих прогибов вид после проведения процедуры корректировки с учетом приведения к расчетной температуре представлен на рисунке Г.4.

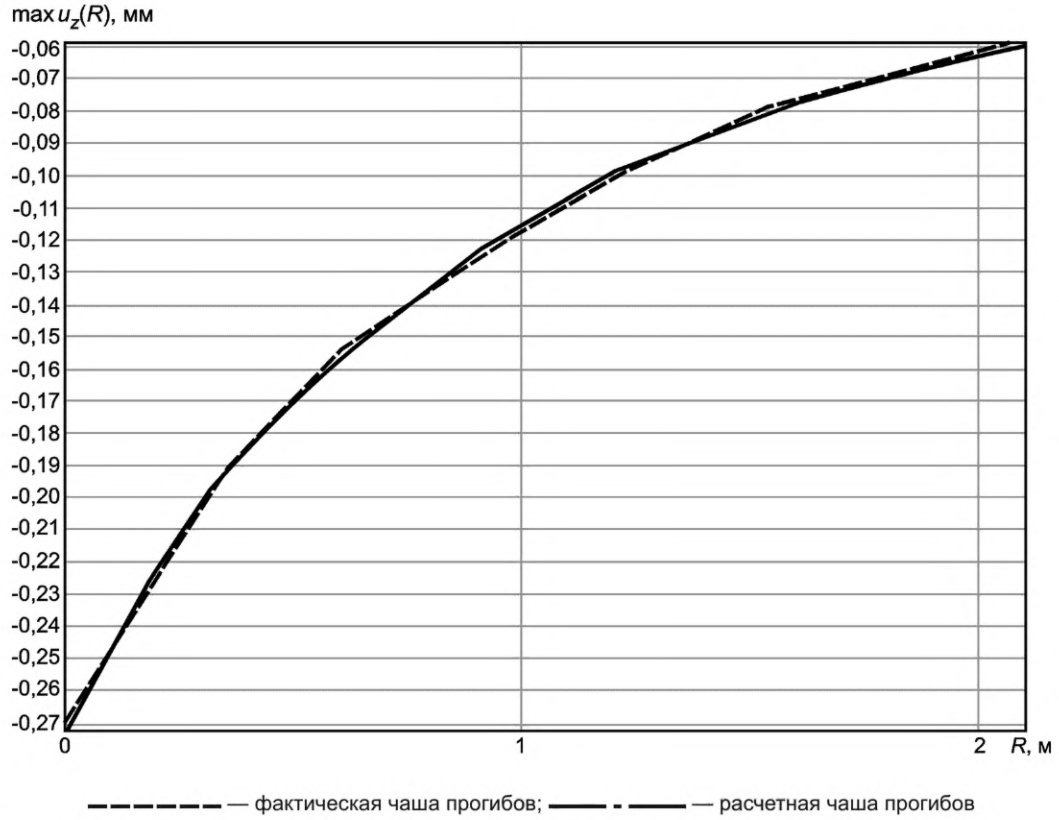


Рисунок Г.4 — Расчетная чаша прогибов, построенная с использованием математической модели, и фактическая чаша прогибов, построенная по результатам измерений после корректировки

Результаты определения эксплуатационных значений модулей упругости слоев дорожной одежды по итогам корректировки с учетом приведения к расчетной температуре и к расчетному времени приложения нагрузки приведены в таблице Г.5.

Таблица Г.5 — Результаты расчета модулей упругости конструктивных слоев дорожной одежды

Наименование конструктивного элемента	Толщина слоя, см	Значение модуля упругости слоя после корректировки с учетом расчетной температуры, МПа	Значение модуля упругости слоя после корректировки, приведенное к расчетному времени приложения нагрузки, МПа	Проектное значение модуля упругости слоя, МПа
Асфальтобетон	20	2185	1450	1800
Щебеночно-песчано-цементная смесь М60	20	1087	1087	800
Щебень фракционированный марки 800, фракции 40 — 70 мм	45	200	200	350
Грунт земляного полотна	Безразмерная, не ограничена снизу	71	71	41

В соответствии с полученным результатом отмечено значительное снижение модуля упругости пакета слоев асфальтобетона и слоя основания из фракционированного щебня в сравнении с проектными значениями, что подтверждается результатами визуальной оценки [наличие дефектов, обусловленных снижением несущей способности конструкции (сетка трещин, неровности, связанные с ямочным ремонтом)] и снижением способности асфальтобетона распределять нагрузку (поперечные трещины, продольные боковые трещины).

В качестве мероприятий по восстановлению несущей способности дорожной одежды рекомендуется замена слоев асфальтобетона.

Г.2 Пример 2. Оценка прочности конструктивных слоев дорожной одежды на этапе эксплуатации

Г.2.1 Исходные данные об участке автомобильной дороги

Дорожная одежда, запроектированная в 2019 году в соответствии с действующими на тот момент нормативными документами:

- ЩМА 16 на ПБВ 60, толщина слоя 5 см;
- А22 НТ на битумном вяжущем БНД 70/100, толщина слоя 9 см;
- А32 ОТ на битумном вяжущем БНД 70/100, толщина слоя 13 см;
- щебеночно-песчаная смесь, укрепленная цементом М40, толщина слоя 12 см;
- гранитный щебень фракции 31,5 — 63,0 мм М1000, уложенный по способу заклинки, толщина слоя 15 см;
- песок средней крупности.

Г.2.2 Процедура определения модулей упругости конструктивных слоев дорожной одежды

В качестве примера приведено решение задачи определения модулей упругости слоев дорожных одежд на одной из точек на данном участке эксплуатируемой автомобильной дороги.

Исходные данные содержат информацию о фактической чаше прогиба, представленную в таблице Г.6, а также параметрах нагружения и прочих характеристиках.

Таблица Г.6 — Результаты замера фактической чаши прогиба

Измеритель прогиба	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
Расстояние от центра приложения нагрузки, мм	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Значение прогиба, мкм	178,2	141,7	128,1	111,1	96,5	74,3	58,2	46,9	39,1	33,9

Методика построения расчетной чаши прогибов с использованием математической модели представлена в приложении В. Расчет чаши прогибов осуществляется в точках с координатами, соответствующими координатам точек установки измерителей прогиба при экспериментальном нагружении. Принятая в примере конфигурация установки измерителей прогиба представлена в таблице Г.6.

Для рассматриваемых выше расчетной и фактической чаш упругих прогибов вид до проведения процедуры корректировки представлен на рисунке Г.5.

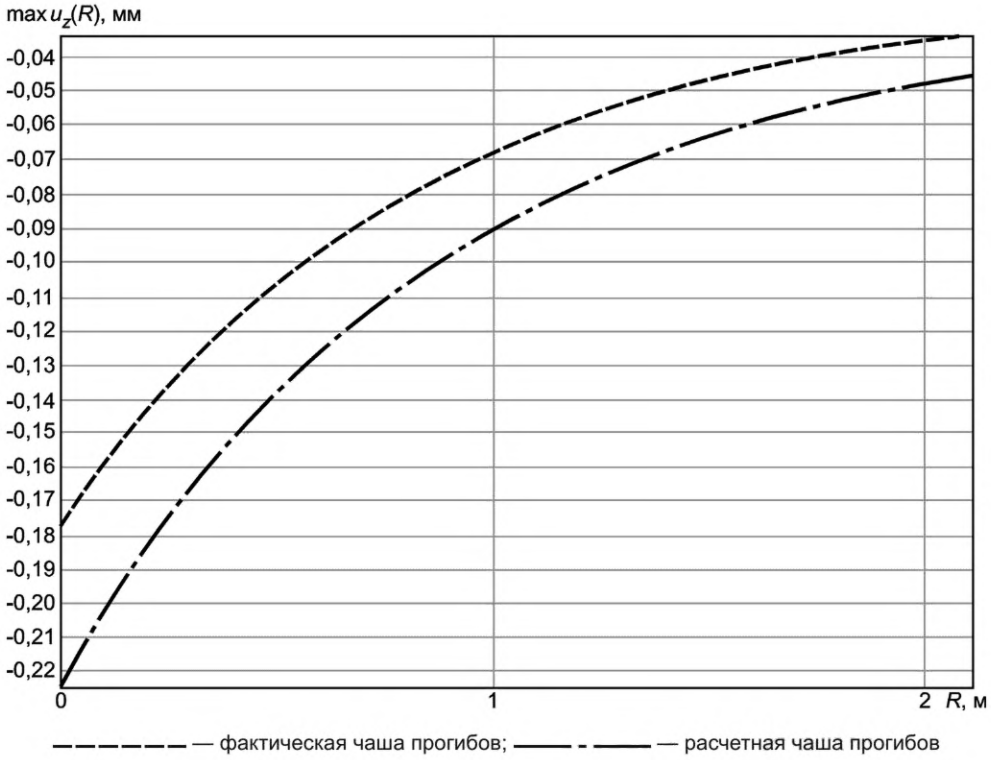


Рисунок Г.5 — Расчетная чаша прогибов, построенная с использованием математической модели, и фактическая чаша прогибов, построенная по результатам измерений

Алгоритм корректировки расчетной и фактической чаш прогибов представлен в приложении В. Для рассматриваемых выше чаш упругих прогибов вид после проведения процедуры корректировки представлен на рисунке Г.6.

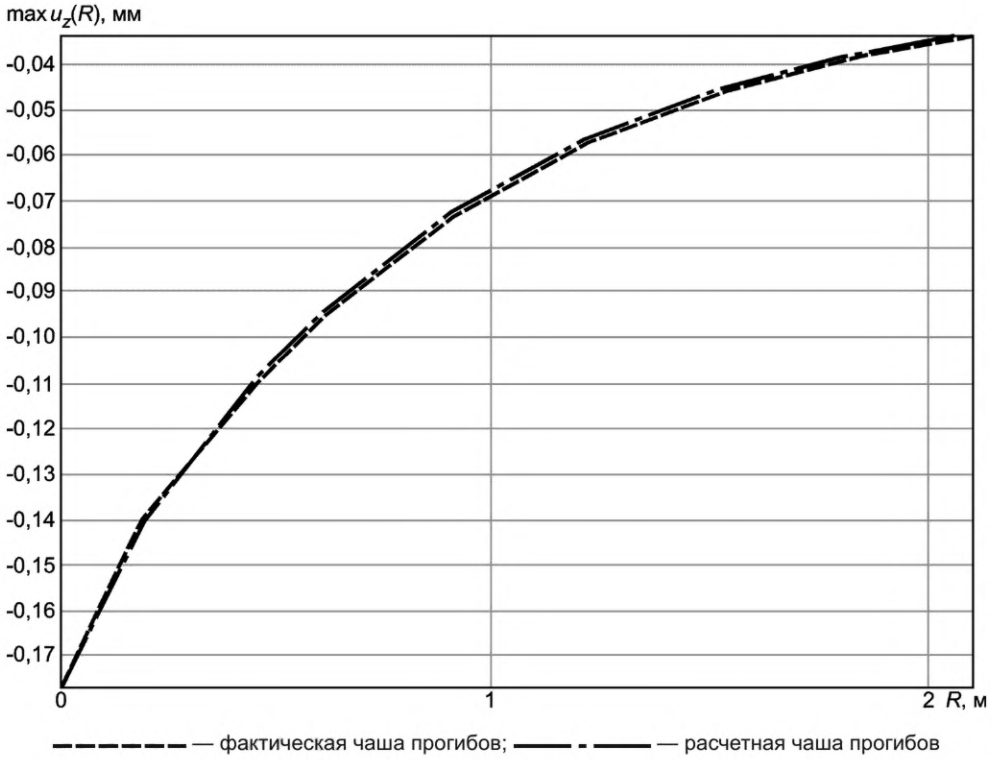


Рисунок Г.6 — Расчетная чаша прогибов, построенная с использованием математической модели, и фактическая чаша прогибов после корректировки

Результаты определения фактических значений модулей упругости слоев дорожной одежды по итогам корректировки приведены в таблице Г.7.

Таблица Г.7 — Результаты расчета модулей упругости конструктивных слоев дорожной одежды

Наименование конструктивного элемента	Толщина слоя, см	Значение модуля упругости слоя после корректировки, МПа
Асфальтобетон	27	4731
Щебеночно-песчаная смесь, укрепленная цементом М40	12	619
Гранитный щебень фракции 31,5 — 63,0 мм М1000, уложенный по способу заклинки	15	480
Песок средней крупности	Безразмерная, не ограничена снизу	177

Полученные значения модулей упругости соответствуют фактической температуре проведения измерений (T = 15 °С) и времени действия импульса установки динамического нагружения, равного 0,02 — 0,03 с. Для принятия решений о необходимости/отсутствии необходимости проведения ремонтных мероприятий на обследованном участке необходимо приведение полученных результатов к расчетному времени приложения нагрузки.

Данные упругих прогибов, замеренных при фактической температуре и приведенных к расчетной температуре, для каждого измерителя прогиба установки динамического нагружения приведены в таблице Г.8.

Таблица Г.8 — Фактическая чаша прогиба, приведенная к расчетной температуре

Измеритель прогиба	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
Значение прогиба, мкм	163,7	133,3	120,8	105,9	92,6	72,4	57,3	46,1	38,4	33,9

Осуществляют расчет модулей упругости конструктивных слоев дорожной одежды и грунта рабочего слоя с учетом скорректированной чаши упругих прогибов. Для рассматриваемых выше расчетной и фактической чаш упругих прогибов вид до проведения процедуры корректировки с учетом приведения к расчетной температуре представлен на рисунке Г.7.

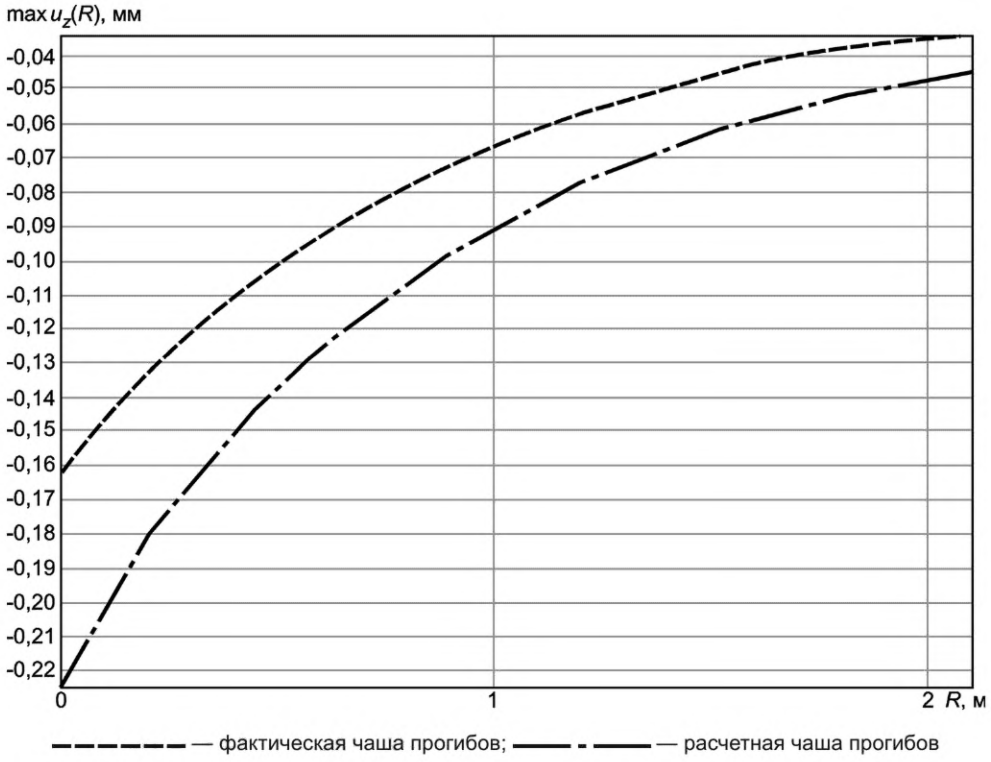


Рисунок Г.7 — Расчетная чаша прогибов, построенная с использованием математической модели, и фактическая чаша прогибов, построенная по результатам измерений

Алгоритм корректировки расчетной и фактической чаш прогибов представлен в приложении В. Для рассматриваемых выше чаш упругих прогибов вид после проведения процедуры корректировки с учетом приведения к расчетной температуре представлен на рисунке Г.8.

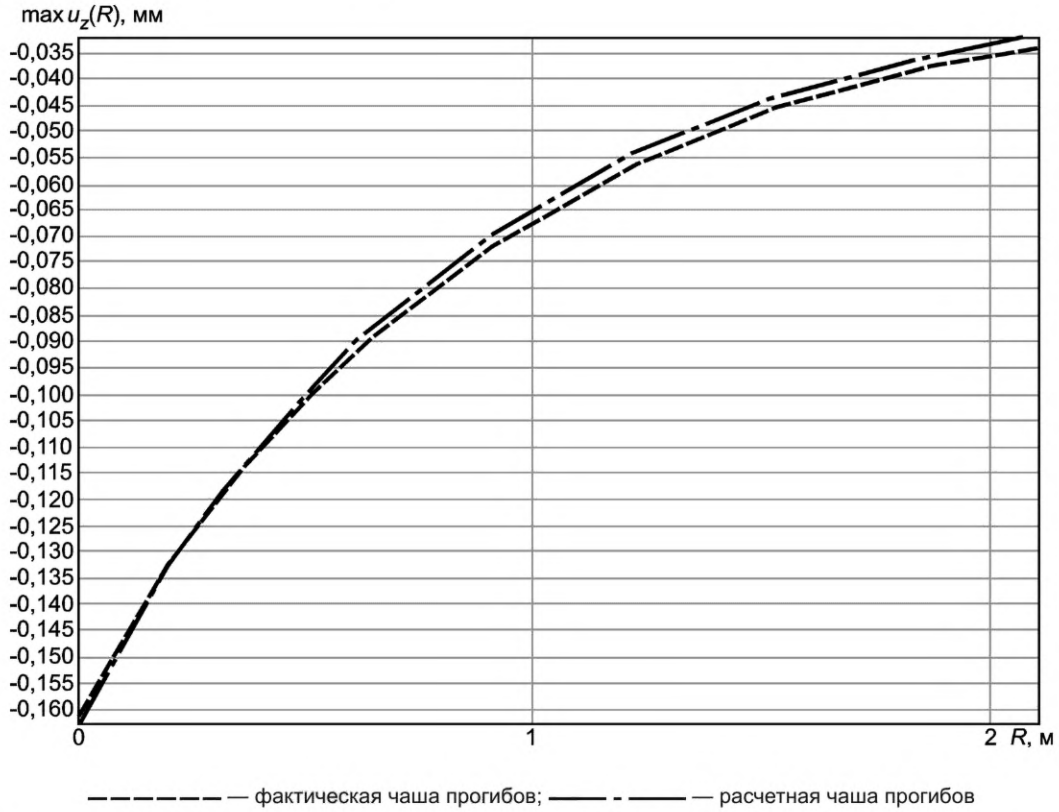


Рисунок Г.8 — Расчетная чаша прогибов, построенная с использованием математической модели, и фактическая чаша прогибов после корректировки

Результаты определения эксплуатационных значений модулей упругости слоев дорожной одежды по итогам корректировки с учетом приведения к расчетной температуре и к расчетному времени приложения нагрузки приведены в таблице Г.9.

Таблица Г.9 — Результаты расчета модулей упругости конструктивных слоев дорожной одежды

Наименование конструктивного элемента	Толщина слоя, см	Значение модуля упругости слоя после корректировки с учетом расчетной температуры, МПа	Значение модуля упругости слоя после корректировки, приведенное к расчетному времени приложения нагрузки, МПа	Проектное значение модуля упругости слоя, МПа
Асфальтобетон	27	4731	4116	2685
Щебеночно-песчаная смесь, укрепленная цементом М40	12	619	619	550
Гранитный щебень фракции 31,5 — 63,0 мм М1000, уложенный по способу заклинки	15	457	457	350
Песок средней крупности	Безразмерная, не ограничена снизу	186	186	100

По результатам испытаний модули упругости слоев дорожной одежды соответствуют проектным значениям.

Приложение Д
(справочное)

Тестовые примеры для валидации и отладки программных комплексов

Д.1 В данном приложении представлены тестовые примеры, содержащие входные данные для выполнения моделирования, в соответствии с алгоритмом, приведенным в приложении В, которые могут быть использованы для подтверждения корректности различных программных продуктов, реализующих требования настоящего стандарта.

Д.1.1 Исходные данные (пример 1)

Количество слоев, включая земляное полотно, — 3.

Исходные данные по конструктивным слоям и рабочему слою земляного полотна представлены в таблице Д.1.

Таблица Д.1 — Исходные данные по конструктивным слоям и рабочему слою земляного полотна

Номер слоя начиная от поверхности	Материал слоя	Толщина, см	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность слоя, кг/м^3
1	Асфальтобетон	20	2500	0,35	2400
2	Щебень	30	350	0,35	1600
3	Грунт — суглинок	0	41	0,35	2000

Температура асфальтобетона при испытании — 15 °С.

Давление, воспроизводимое установкой ударного нагружения, — 800 кПа.

Фактическая чаша прогибов представлена в таблице Д.2.

Таблица Д.2 — Фактическая чаша прогиба

Измеритель прогиба	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
Значение прогиба, мкм	314,5	266,6	240,5	197,2	163,4	112,2	83,1	65,8	56,5

Д.1.2 Результаты расчета

Фактическая чаша прогибов с учетом температурной поправки представлена в таблице Д.3.

Таблица Д.3 — Фактическая чаша прогибов с учетом температурной поправки

Измеритель прогиба	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
Значение прогиба, мкм	269,1	231,9	210,8	177,0	148,9	104,3	79,4	62,3	54,0

Расчетная чаша прогибов представлена в таблице Д.4.

Таблица Д.4 — Расчетная чаша прогибов

Измеритель прогиба	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
Значение прогиба, мкм	507,5	436,7	402,2	356,6	316,9	252,1	202,6	165,2	137,8

Расчетная форма чаши прогибов представлена на рисунке Д.1.

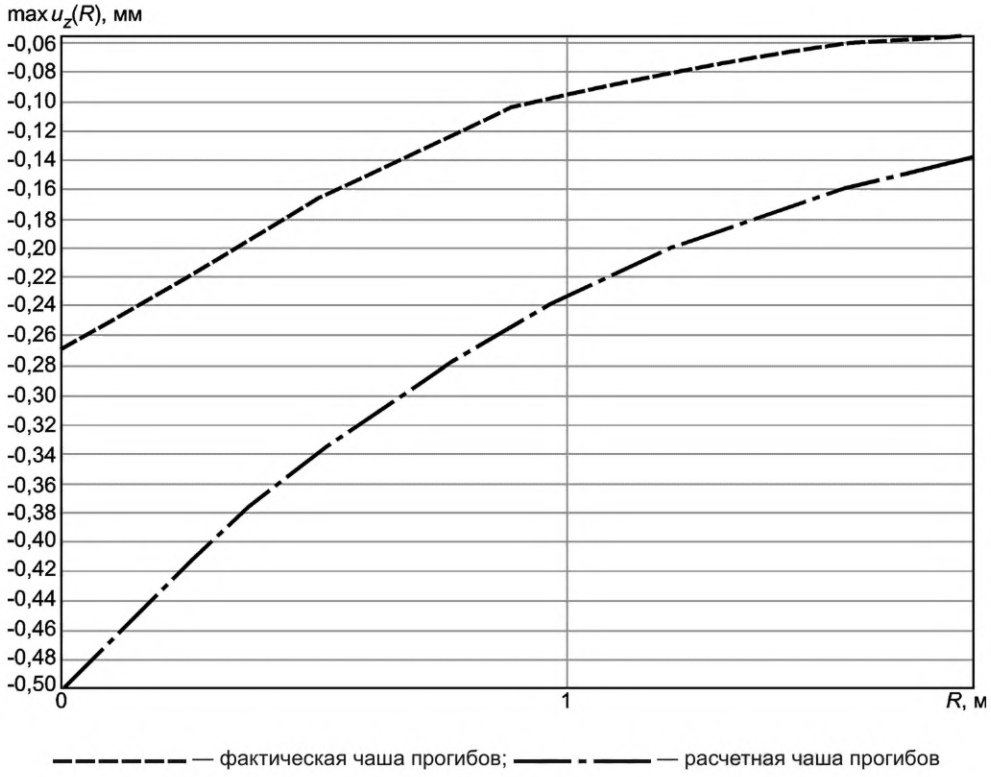


Рисунок Д.1 — Расчетная форма чаши прогибов

Результат корректировки чаши прогибов представлен в таблице Д.5.

Таблица Д.5 — Скорректированная расчетная чаша прогибов

Измеритель прогиба	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
Значение прогиба, мкм	277,2	231,3	207,1	174,7	147,2	107,4	81,6	65,1	54,1

Скорректированная расчетная чаша прогибов представлена на рисунке Д.2.

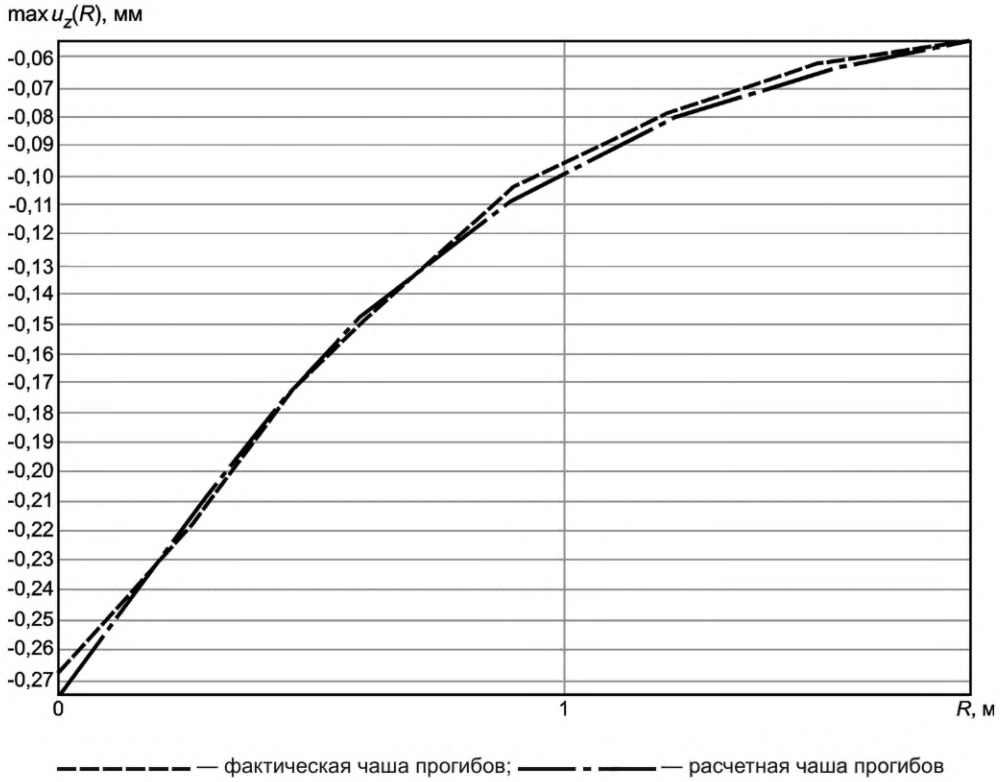


Рисунок Д.2 — Скорректированная расчетная чаша прогибов

Скорректированные фактические модули упругости материалов слоев и грунта земляного полотна приведены в таблице Д.6.

Таблица Д.6

Номер слоя начиная от поверхности	Материал слоя	Толщина, см	Фактический модуль упругости, МПа
1	Асфальтобетон	20	5092 (4009*)
2	Щебень	30	292
3	Грунт — суглинок	0	146
*С учетом корректировки по времени приложения нагрузки.			

Значения модулей упругости при проверке программы могут отличаться в пределах 5 % от эталонных значений.

Д.2.1 Исходные данные (пример 2)

Количество слоев, включая земляное полотно, — 4.

Исходные данные по конструктивным слоям и рабочему слою земляного полотна представлены в таблице Д.7.

Таблица Д.7 — Исходные данные по конструктивным слоям и рабочему слою земляного полотна

Номер слоя начиная от поверхности	Материал слоя	Толщина, см	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность слоя, кг/м^3
1	Асфальтобетон	25	2400	0,35	2400
2	Щебеночно-песчаная-цементная смесь	25	700	0,35	2000
3	Песок	30	120	0,35	1600
4	Грунт — суглинок	0	41	0,35	2000

Температура асфальтобетона при испытании — 20 °С.
Давление, воспроизводимое установкой ударного нагружения, — 800 кПа.
Фактическая чаша прогибов представлена в таблице Д.8.

Таблица Д.8 — Фактическая чаша прогибов

Измеритель прогиба	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
Значение прогиба, мкм	270,1	201,3	177,2	160,0	144,9	116,8	94,9	69,0	56,9

Д.2.2 Результаты расчета

Фактическая чаша прогибов с учетом температурной поправки представлена в таблице Д.9.

Таблица Д.9 — Фактическая чаша прогибов с учетом температурной поправки

Измеритель прогиба	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
Значение прогиба, мкм	229,3	180,1	159,8	146,9	134,9	112,8	93,2	67,0	55,0

Расчетная чаша прогибов представлена в таблице Д.10.

Таблица Д.10 — Расчетная чаша прогибов

Измеритель прогиба	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
Значение прогиба, мкм	278,3	227,8	209,3	187,9	169,2	136,9	110,5	89,5	73,4

Расчетная форма чаши прогибов представлена на рисунке Д.3.

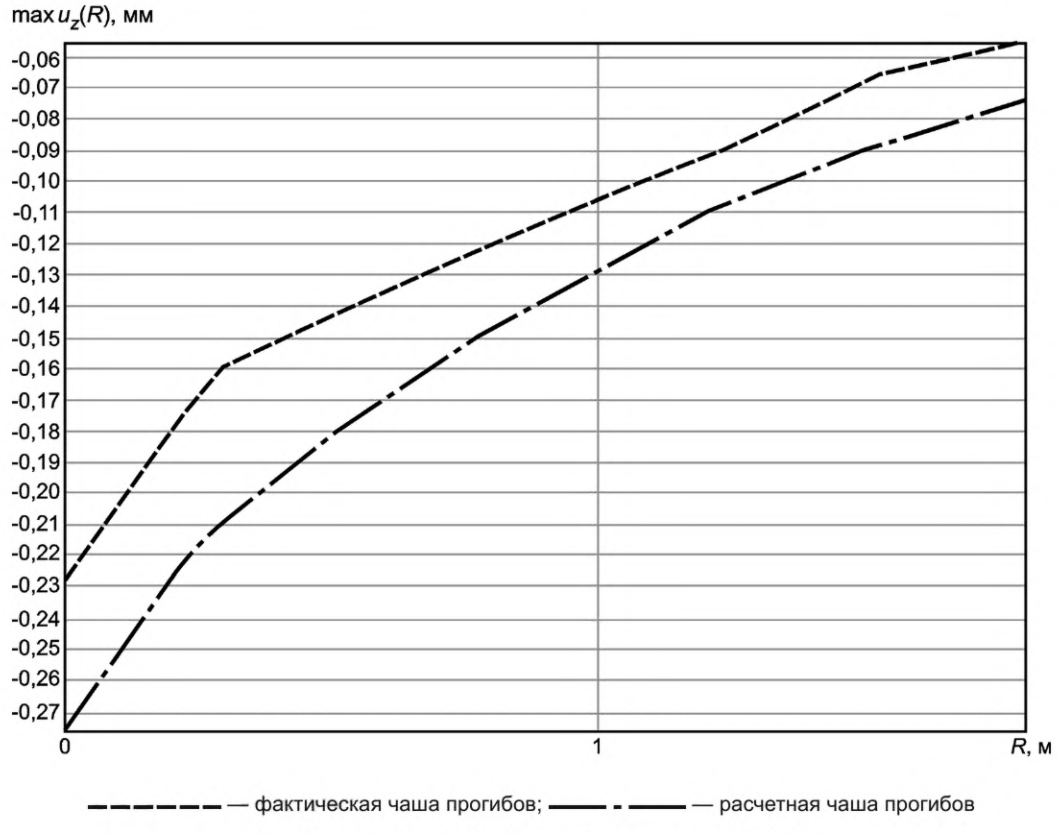


Рисунок Д.3 — Расчетная форма чаши прогибов

Результат корректировки чаши прогиба представлен в таблице Д.11.

Таблица Д.11 — Скорректированная расчетная чаша прогибов

Измеритель прогиба	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
Значение прогиба, мкм	228,9	179,5	162,9	146,2	132,4	108,9	89,4	73,4	60,9

Скорректированная расчетная чаша прогибов представлена на рисунке Д.4.

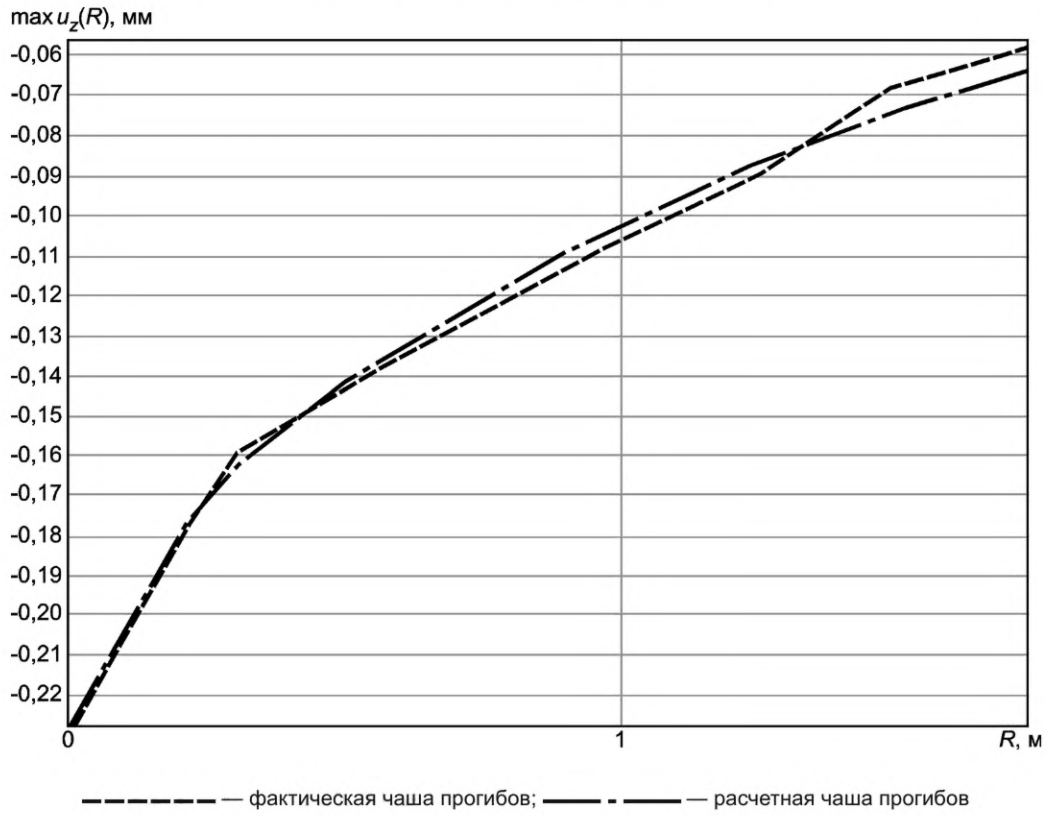


Рисунок Д.4 — Скорректированная расчетная чаша прогибов

Скорректированные фактические модули упругости материалов слоев и грунта земляного полотна приведены в таблице Д.12.

Таблица Д.12

Номер слоя начиная от поверхности	Материал слоя	Толщина, см	Фактический модуль упругости, МПа
1	Асфальтобетон	25	2157 (1850*)
2	Щебеночно-песчано-цементная смесь	25	1035
3	Песок	30	264
4	Грунт — суглинок	0	58
*С учетом корректировки по времени приложения нагрузки.			

Значения модулей упругости при проверке программы могут отличаться в пределах 5 % от эталонных значений.

Приложение Е
(справочное)

Форма таблицы с сопоставлением проектных и фактических модулей упругости

Форма таблицы с сопоставлением проектных и фактических модулей упругости представлена в таблице Е.1.

Таблица Е.1 — Форма таблицы с сопоставлением проектных и фактических модулей упругости

Номер слоя начиная от поверхности	Наименование и материал конструктивного элемента	Толщина слоя, см	Проектный модуль упругости, МПа	Фактический модуль упругости, МПа
1	Материал 1			
2	Материал 2			
3	Материал 3			
4	Грунт земляного полотна	*		
* Грунт земляного полотна принимается безразмерным, не ограниченным по глубине снизу.				

Библиография

[1] ОДМ 218.4.039-2018 Рекомендации по диагностике и оценке технического состояния автомобильных дорог

[2] ОДМ 218.3.075-2016 Рекомендации по контролю качества выполнения дорожно-строительных работ методом георадиолокации

УДК 625.85:006.354 ОКС 93.080.99

Ключевые слова: прочность, упругий прогиб, общий модуль упругости, фактическая чаша динамических прогибов, расчетная чаша динамических прогибов

Редактор *Н.В. Таланова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Л.С. Лысенко*
Компьютерная верстка *Г.Д. Мухиной*

Сдано в набор 07.12.2021. Подписано в печать 12.01.2022. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 6,05. Уч.-изд. л. 4,86.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru