

# УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

## LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES



УДК 625.76

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-97-106>

### Остаточный ресурс дорожных одежд на автомобильных дорогах с высокой интенсивностью движения

А.Н. Тиратурян  ✉, М.Э.Р. Абделаал 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ [tiraturjan@list.ru](mailto:tiraturjan@list.ru)



EDN: BOCKDU

#### Аннотация

**Введение.** Актуальной задачей в области содержания автомобильных дорог является объективная оценка их остаточного ресурса. Существующие методы часто носят субъективный характер или требуют сложных процедур. Целью данной работы является разработка нового подхода к такой оценке, основанного на инструментальных измерениях.

**Материалы и методы.** Объектом исследования выступают дорожные одежды автомобильных дорог. В основе метода лежит модель, связывающая величину упругого прогиба покрытия с расчетным числом циклов нагружения до исчерпания прочности. Прогиб измерялся с помощью установки ударного нагружения (Falling Weight Deflectometer). Методика позволяет адаптировать модель к разным условиям путем калибровки коэффициентов.

**Результаты исследования.** На основе предложенной модели создана четырехуровневая шкала состояния дорожной одежды по величине остаточного ресурса: нормативное, удовлетворительное, предостказное и критическое. Для повышения надежности оценки в качестве расчетного значения для точки замера используется медианное значение ресурса, а для характеристики всего участка — его средневзвешенная величина.

**Обсуждение и заключение.** Разработанный подход позволяет давать количественную оценку остаточного ресурса на основе инструментальных данных. Внедрение данной методики повысит объективность диагностики и поможет оптимально планировать ремонтные работы. Перспективы исследования связаны с дальнейшей адаптацией модели для различных дорожно-климатических условий.

**Ключевые слова:** упругий прогиб, остаточный ресурс, FWD, средневзвешенная оценка, жесткие дорожные одежды, категория состояния дорожной одежды, дефекты покрытия

**Для цитирования.** Тиратурян А.Н., Абделаал М.Э.Р. Остаточный ресурс дорожных одежд на автомобильных дорогах с высокой интенсивностью движения. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2026;5(2):97–106. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-97-106>

Original Empirical Research

### Residual Resource of Road Surfacing on High-Traffic Roads

Artem N. Tiraturjan  ✉, Mohamed Elsayed Ragab Abdelaal 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ [tiraturjan@list.ru](mailto:tiraturjan@list.ru)

#### Abstract

**Introduction.** An urgent task facing the field of road maintenance is an objective assessment of their residual resource. The existing methods are typically subjective or require that complex procedures are carried out. The aim of the study is to develop a new approach to such an assessment based on instrumental measurements.

**Materials and Methods.** The object of the study is road surfacing of highways. The method is based on a model that relates the amount of elastic deflection of the coating to the estimated number of loading cycles until the strength has

been exhausted. Deflection was measured using a Falling Weight Deflectometer. The technique allows one to adapt the model to a variety of conditions by calibrating the coefficients.

**Research Results.** Based on the suggested model, a four-level scale of the condition of the road surface has been designed according to the size of the residual resource: a normative, satisfactory, pre-maintenance and critical one. In order to increase the reliability of the estimate, the median value of the resource is used as the calculated value for the measuring point, and its weighted average value is used to characterize the entire site.

**Discussion and Conclusion.** The developed approach makes it possible to quantify the residual resource based on instrumental data. Implementing this technique would increase the objectivity of diagnostics and assist optimal repair planning. The prospects of the study are related to the further adaptation of the model for a variety of road and weather conditions.

**Keywords:** elastic deflection, residual resource, FWD, weighted average estimate, non-rigid road surfacing, road surfacing condition category, coating defects

**For citation.** Tiratourjan AN, Abdelaal MER Residual Resource of Road Surfacing on High-Traffic Roads. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(2):97–106. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-2-97-106>

**Введение.** Управление состоянием дорожных конструкций — одно из наиболее ответственных направлений в области дорожного хозяйства. Оно требует четко установленных критериев и правил назначения видов и сроков ремонтных работ, а также их планирование по годам. Учитывая большие экономические затраты, направляемые на поддержание сетей дорог в требуемом состоянии, этот вопрос решается, как правило, на основе предварительно проведенной инструментальной оценки. Однако подходы к интерпретации результатов инструментальной оценки в различных странах и источниках сильно разнятся в зависимости от исторического опыта проектирования и конструирования дорожных одежд автомобильных дорог, а также инструментальной базы, традиционно применяемой в разных странах и регионах.

В целом все виды управленческой деятельности в области управления состоянием дорожных одежд можно разделить на два вида — сетевой и проектный. Сетевой уровень предполагает общую оценку состояния дорожных одежд, прогнозирование изменения их состояния в течение срока эксплуатации, прогнозирование остаточного ресурса и их срока службы, формирование планов работ по содержанию, ремонту и капитальному ремонту, а также расчет затрат в течение жизненного цикла при различных режимах эксплуатации с выбором наиболее оптимального. На проектном уровне решаются задачи расчета и конструирования дорожных одежд в рамках уже принятого решения о капитальном ремонте или реконструкции, и даются экономические оценки для детально разработанного проектного решения [1, 2].

Основные задачи, решаемые на каждом уровне управления состоянием дорожных одежд, определяют виды моделей, лежащих в их основе. Так, для сетевого уровня управления состоянием применяются преимущественно феноменологические модели, базирующиеся на концепции теории надежности, теории вероятности и математической статистики. Проектный уровень предполагает, как правило, использование структурных моделей, в основе которых лежат положения механики деформируемого твердого тела, механики разрушения, мезомеханики [3–5].

Оценка состояния автомобильных дорог на сетевом уровне осуществляется на основе большого количества различных показателей, применяемых в различных системах управления состоянием дорожных одежд (PMS). Подробное описание данных показателей приводится в [6, 7]. В частности, в работе [6] все показатели состояния дорожных одежд разделяются на эксплуатационные, структурные и комбинированные. Эксплуатационные показатели ориентированы на фактическую продольную ровность покрытия дорожных одежд. Наиболее известными из них являются: используемый во всем мире показатель продольной ровности покрытия IRI; показатель RCI (ride comfort index); показатель RN (ride number); показатель PSR (pavement serviceability rating); в некоторых случаях для оценки продольной ровности используют аналог IRI, называемый PI (profile index).

Наиболее распространенным структурным показателем, используемым на сетевом уровне, является структурное число, рассчитываемое исходя из модуля упругости грунта и эквивалентного числа проходов одиночной оси (ESAL). Зависимость для определения фактического структурного числа имеет вид:

$$S_{n,eff} = 0,4728(D_0 - D_{1,5H_p})^{-0,4810} H_p^{0,7581},$$

где  $D_0$  — упругий прогиб в центре нагружения;  $D_{1,5H_p}$  — упругий прогиб, зарегистрированный на расстоянии, равном  $1,5H_p$ ;  $H_p$  — толщина дорожной одежды.

В качестве аналога структурного числа можно привести определяемый в Российской Федерации на этапе проектирования минимальный требуемый общий модуль упругости  $E_{min}^{TP}$ :

$$E_{min}^{TP} = \sqrt{\frac{p}{600}} \lg(\sum N_{act}) - 3,55,$$

где  $p$  — расчетное давление на поверхности покрытия (800 кПа);  $\sum N_{act}$  — суммарное число приложений расчетной нагрузки.

Комбинированные показатели объединяют в себе несколько индексов, характеризующих продольную ровность покрытия и дефекты на покрытии. В некоторых случаях комбинируют показатели, характеризующие эксплуатационное состояние и структурные показатели. В качестве примера можно привести индекс качества дорожного покрытия (PQI). Он включает в себя индекс структурной адекватности (SAI), индекс разрушения поверхности (SDI) и индекс комфортности езды (RCI). Ключевым моментом в построении комбинированного индекса является структурированная техника для сбора экспертных мнений. По сути, это калибровка, результат которой должен быть статистически надежным и лишенным систематических ошибок. В разных регионах зависимости для определения данного показателя могут отличаться. Так, например, расчет показателя PQI по методике MnDOT [8, 9] (департамента транспорта Миннесоты) рассчитывается по формуле:

$$PQI = \sqrt{RQI \cdot SR},$$

где  $RQI$  — индекс комфортности езды;  $SR$  — рейтинг покрытия (surface rating).

Так как показатель  $RQI$  оценивается в диапазоне 0–5, а  $SR$  — в диапазоне 0–4, то итоговая оценка по показателю PQI может принимать значения в диапазоне от 0–4,5.

В целом нужно сказать, что все описанные показатели позволяют эффективно характеризовать текущее состояние дорожной одежды, однако их увязка со сроком службы представляет собой достаточно сложную задачу, зачастую решаемую субъективно.

Ключевым понятием в управлении состоянием дорожных одежд на сетевом уровне является понятие остаточного ресурса / срока службы дорожной одежды (в более современной формулировке — остаточного срока обслуживания). Остаточный ресурс определяется как количество циклов приложений нагрузок или количество лет до момента наступления отказа дорожной одежды по какому-либо критерию. С 2014 года с момента выхода документа [10] вместо термина остаточный ресурс в дорожную практику пришло понятие remaining service life (RSL) [11–15], которое характеризует остаточный срок до выполнения определенного вида работ, которыми могут являться как работы по превентивному содержанию, так и работы по ремонту и капитальному ремонту автомобильных дорог.

Основными методами и моделями для прогнозирования RSL выступают модели, базирующиеся на практиках проектирования, или же эмпирические модели. Говоря о моделях, базирующихся на практике проектирования, основной приоритет отдается моделям, приведенным в документе Mechanistic empirical pavement design guide (MEPDG). Данные модели позволяют определять остаточную величину ESAL, исходя из модели работоспособности асфальтобетона на усталостное разрушение и модели прогнозирования накопления колес<sup>1</sup> [16–18].

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

$$N_{fi}(\varepsilon_i) = C_f K_{f1} \varepsilon_i^{K_{f2}} E^{K_{f3}},$$

где  $N_{fi}(\varepsilon_i)$  — количество циклов приложений расчетной нагрузки, определяемое исходя из величины растягивающей деформации на нижней границе пакета асфальтобетонных слоев  $\varepsilon_i$ ;  $C_f$  — калибровочный фактор, определяемый исходя из результатов полевых и лабораторных измерений;  $K_{f1}$  — эмпирический параметр в стандартной модели,  $K_{f1} = 1,2$ ;  $K_{f2}$  — эмпирический параметр в стандартной модели,  $K_{f2} = -3,291$ ;  $K_{f3}$  — эмпирический параметр в стандартной модели,  $K_{f3} = -0,854$ .

Модель прогнозирования остаточного ресурса по накоплению колес на поверхности асфальтобетона представляется в виде:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = K_1 10^{-3,4488 T^{1,5606} N^{0,479244}},$$

где  $\varepsilon_p$  — пластическая составляющая деформации сжатия в слоях асфальтобетона;  $\varepsilon_r$  — упругая деформация сжатия в слоях асфальтобетона, рассчитываемая по модели упругого слоистого полупространства;  $T$  — температура в градусах Фаренгейта;  $N$  — суммарная нагрузка за период эксплуатации в ESAL.

Достоинством этих моделей является их хорошая калибровка и возможность гибкой подстройки под условия региона проектирования за счет большого числа эмпирических коэффициентов. Недостаток — реализация методики

<sup>1</sup> Руководство по механистически-эмпирическому проектированию дорожных покрытий: практическое руководство. Вашингтон: AASHTO; 2020. 600 p. URL: [https://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/hmec/pubs/module\\_e/participant\\_workbook.pdf](https://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/hmec/pubs/module_e/participant_workbook.pdf) (дата обращения: 01.03.2026).

MEPDG требует наличия большого числа исходных данных, которые на этапе эксплуатации автомобильной дороги зачастую отсутствуют. Как правило, это значительно нивелирует высокую точность и эффективность данных моделей.

К эмпирическим подходам для прогнозирования RSL можно отнести построение кривых выживаемости, применение метода пропорциональных рисков (Failure Cox Proportional Hazard), применение вероятностных и статистических моделей, таких как модели Байеса, цепи Маркова, использование моделей линейной и нелинейной регрессии [19–22]. К более современным подходам можно отнести применение искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов [23–25].

В целом же следует отметить, что несмотря на многообразие подходов на текущий момент прогнозирование остаточного ресурса является достаточно актуальной задачей. С одной стороны, методы прогнозирования должны базироваться на измеримых параметрах состояния, присутствующих в системе диагностики автомобильных дорог каждого региона и страны. С другой стороны, модель для прогнозирования остаточного ресурса должна быть достаточно универсальной и хорошо калибруемой для различных условий. Помимо этого, важно отметить, что автомобильная дорога, являясь линейно-протяженным объектом, характеризуется значительной неоднородностью и, как следствие, непрерывным изменением значений остаточного ресурса по каждому характерному участку. В этом случае большое значение имеет выработка подхода к определению значения величины остаточного ресурса, эффективно и информативно характеризующей участок автомобильной дороги в целом.

**Материалы и методы.** Ресурс автомобильной дороги целесообразно выражать в виде числа приложений расчетной нагрузки за ее срок службы. Расчетный ресурс автомобильной дороги определяется как:

$$\sum N_{calc} = 0,7 f_{lane} \frac{K_{sum}}{q^{T_l-1}} T N_{calc} k_n,$$

где  $f_{lane}$  — коэффициент полосности, характеризующий процент транспортного потока, движущегося по наиболее загруженной полосе движения;  $K_{sum}$  — коэффициент суммирования;  $T_l$  — срок службы;  $T$  — количество расчетных дней в году;  $N_{calc}$  — интенсивность движения в расчетных осях на 1 год срока службы;  $k_n$  — коэффициент, учитывающий отклонение фактического транспортного потока от прогнозируемого;  $q$  — коэффициент прироста интенсивности движения.

$$N_{calc} = \sum N_i k_i,$$

где  $N_i$  — интенсивность движения  $i$  группы транспортных средств;  $k_i$  — коэффициент приведения транспортного средства к расчетной осевой нагрузке 115 кН.

Учитывая, что в основе данной зависимости лежит представление о возрастании интенсивности движения по закону геометрической прогрессии, количество циклов нагружения, фактически испытанное дорожной конструкцией, может быть определено на любой год эксплуатации автомобильной дороги в виде значения фактической наработки дорожной одежды —  $\sum N_{act}$ . В этом случае ее остаточный ресурс может быть рассчитан в виде  $\sum N_{resid}$ :

$$\sum N_{resid} = \sum N_{calc} - \sum N_{act}.$$

Недостатком такого подхода является отсутствие связи между фактическим остаточным ресурсом, выражаемым в виде числа циклов приложений расчетной нагрузки, и фактическим структурным состоянием дорожной одежды. Данный недостаток может быть преодолен путем переформулирования зависимости в виде:

$$\frac{pD(1-\mu^2)}{l} = \sqrt{\frac{p}{600}} 98,65 (\lg(\sum N_{act}) - 3,55),$$

$$l = \frac{pD(1-\mu^2)}{113,91 (\lg(\sum N_{act}) - 3,55)},$$

$$\sum N_{act} = 10^{\frac{pD(1-\mu^2)}{113,91 l} + 3,55}.$$

В связи с тем, что зависимость (1) описывает проектное изменение фактического суммарного числа приложений расчетной нагрузки от начального до некоторого предельно допустимого состояния дорожной конструкции, аналогичное изменение связано и с увеличением упругого прогиба на поверхности конструкции. Таким образом, исходя из фактического упругого прогиба, зарегистрированного на поверхности дорожной одежды, возможно напрямую определить значение фактической наработки дорожной одежды, и, как следствие, остаточного ресурса. Однако основная проблема заключается в том, что автомобильная дорога, являясь протяженным объектом, не может быть охарактеризована единым значением упругого прогиба, модуля упругости либо любой другой характеристикой. Ниже представлен ряд результатов регистрации упругого прогиба на автомобильных дорогах общего пользования, принадлежащих к федеральной и региональной сети дорог (рис. 1).

Как видно на представленных рисунках, упругий прогиб характеризуется достаточно большим разбросом по линейной протяженности участка. Так, например, коэффициент вариации составляет  $C_v = 0,16$  (рис. 1а),  $C_v = 0,55$  (рис. 1б),  $C_v = 0,47$  — для третьего участка.

В рамках данной работы в качестве показателя, на основе которого определяется остаточный ресурс протяженного участка, предлагается использовать средневзвешенную оценку, определяемую исходя из значения фактического упругого прогиба, зарегистрированного на поверхности, вида:

$$\bar{x} = \frac{\sum \omega_i \alpha_i}{\sum \omega_i}$$

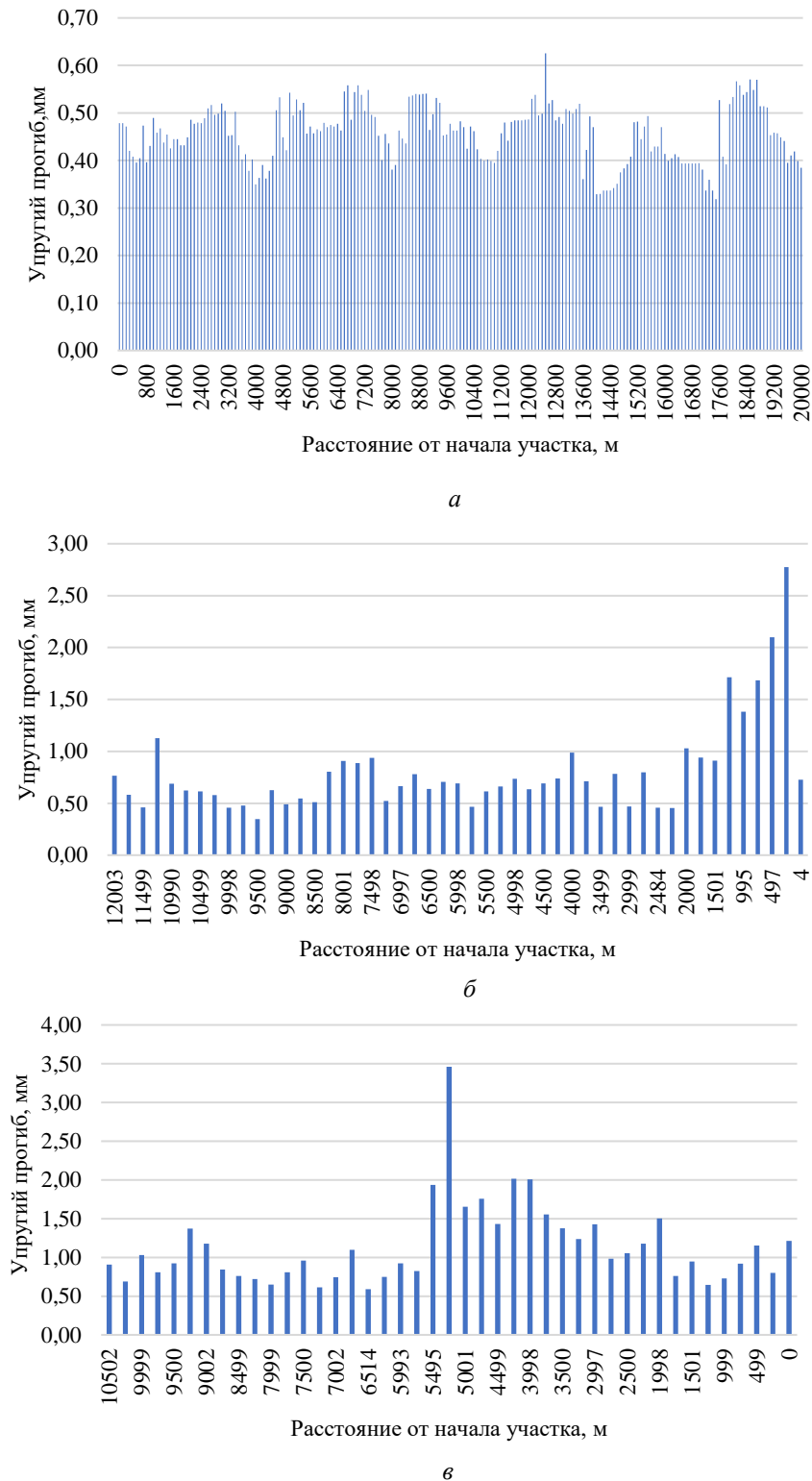


Рис. 1. Фактические измерения упругого прогиба на участках эксплуатируемых автомобильных дорог: а — автомобильная дорога I категории федерального значения, б — автомобильная дорога II категории федерального значения, в — дорога IV категории регионального значения

В качестве весового параметра  $\alpha_i$  принимается длина участка, находящаяся в нормативном, удовлетворительном, неудовлетворительном состоянии по величине остаточного ресурса, а вместо  $\omega_i$  принимается непосредственно величина фактической наработки дорожной конструкции:

$$\sum N_{act} = \frac{\sum N_{act}^i t_i}{\sum t_i}.$$

Таким образом, основной задачей для применения данного подхода является ранжирование участков по четырем уровням в зависимости от величины фактической наработки. Для решения этой задачи целесообразно построить регрессионную модель между значениями фактической наработки и эксплуатационным состоянием дорожной одежды. Данная зависимость была построена на основе испытаний на 60 участках автомобильных дорог (рис. 2). Для регистрации чаши прогиба использовался дефлектометр падающего груза FWD Primax 1500, для регистрации дефектов на поверхности покрытия — диагностическая лаборатория с блоком камер панорамной съемки.

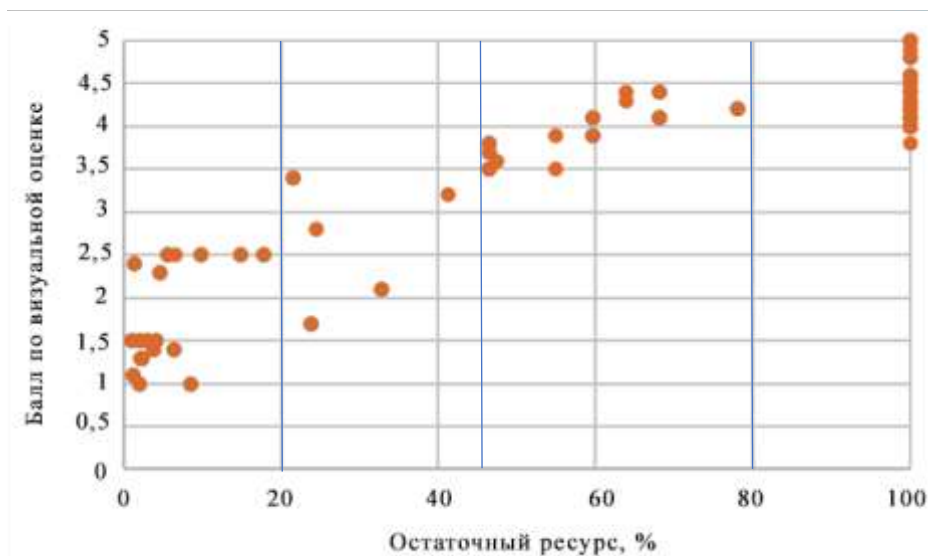


Рис. 2. Зависимость остаточного ресурса от состояния покрытия

По визуальной оценке среднему баллу 1–2,5 соответствует наличие таких дефектов как: сетки трещин площадью покрытия от 30 до 90 % протяженности, полосы наката, частые выбоины, одиночные сетки трещин, колея глубиной более 4 см. Среднему баллу 2,5–3,5 соответствуют дефекты на покрытии в виде продольных боковых трещин, частых поперечных трещин, колеи глубиной 2–3 см. К дефектам, оцениваемым средним баллом 3,5–4,5, относятся дефекты в виде редких поперечных трещин, а к дефектам, оцениваемым выше 4,5 баллов, относят незначительные дефекты в виде одиночных поперечных трещин, продольной центральной технологической трещины.

Итоговая таблица связи между величиной остаточного ресурса и соответствующей категорией состояния дорожной одежды на участке имеет следующий вид (таблица 1).

Таблица 1

Классификация состояния дорожной одежды по величине остаточного ресурса

Остаточный ресурс	Категория состояния
< 20 %	Критическое
20–45 %	Предотказное
45–80 %	Удовлетворительное
> 80 %	Нормативное

Непосредственно в формулу расчета средневзвешенной оценки подставляется медиана каждого интервала значений остаточного ресурса как величина, не подверженная выбросам и экстремальным значениям.

В зависимости от средневзвешенной оценки состояния участка принимается решение об управляющих воздействиях для продления срока эксплуатации либо обеспечения нормативного межремонтного срока службы. В качестве таких мероприятий могут быть выполнены: работы по содержанию дороги с выбором вида слоев износа и защитных слоев, наносимых на покрытие дорожной одежды; ремонтные работы с локальным усилением слоев

основания либо только с заменой изношенных слоев покрытия; работы по капитальному ремонту, предполагающие полную или частичную разборку конструкции дорожной одежды.

**Результаты исследования.** Предлагаемый в данной работе подход к оперативной оценке остаточного ресурса дорожных одежд автомобильных дорог по данным инструментальных измерений упругого прогиба на их поверхности был реализован на ряде участков автомобильных дорог с высокой интенсивностью движения. На всех этих участках значения упругого прогиба характеризовались большой неоднородностью, что затрудняло выбор и назначение управленческих решений по срокам и видам ремонтных работ. Ниже представлены результаты инструментальных исследований, и рассчитаны средневзвешенные значения остаточного ресурса по обследованным участкам федеральных автомобильных дорог с высокой интенсивностью движения (таблица 2).

Таблица 2

Оценка остаточного ресурса на участке автомобильной дороги на различных участках автомобильной дороги М4 «ДОН»

Участок	Остаточный ресурс по фактическому состоянию дорожной конструкции							
	км 492 + 000–517 + 000							
Направление	Прямое				Обратное			
	< 20 %	20–45 %	45–80 %	> 80 %	< 20 %	20–45 %	45–80 %	> 80 %
Остаточный ресурс								
% протяженности участка, соответствующего значениям остаточного ресурса	0	2	5	93	2	0	0	98
Медиана	—	26	67	88	10	—	—	90
Итоговое значение	85,71				88,4			
	км 877 + 000–892 + 000							
% протяженности участка, соответствующего значениям остаточного ресурса	16	16	6	61	6	10	0	84
Медиана	11	31	59	83	15	25	—	83
Итоговое значение остаточного ресурса	63,05				73,12			
	км 892 + 000–907 + 000							
% протяженности участка, соответствующего значениям остаточного ресурса	6	10	0	84	13	16	6	65
Медиана	17	24	—	91	7	24	55	83
Итоговое значение остаточного ресурса	79,86				62,00			
	км 354 + 000–365 + 000							
% протяженности участка, соответствующего значениям остаточного ресурса	8	18	2	71	42	28	10	20
Медиана	15	26	63	85	7	20	60	81
Итоговое значение остаточного ресурса	68,17				30,74			
	км 548 + 000–556 + 000							
% протяженности участка, соответствующего значениям остаточного ресурса	0	23	4	71	22	18	2	58
Медиана	—	33	72	84	9	31	53	83
Итоговое значение остаточного ресурса	71,54				56,76			
	км 1138 + 000–1146 + 000							
% протяженности участка, соответствующего значениям остаточного ресурса	46	54	0	0	55	37	8	0
Медиана	4	24	—	—	6	22	47	—
Итоговое значение остаточного ресурса	14,80				15,20			

Таким образом состояние обследованных участков может быть классифицировано:

- км 492 + 000–517 + 000 в прямом и обратном направлении — нормативное;
- км 877 + 000–892 + 000 в прямом и обратном направлении — удовлетворительное;
- км 892 + 000–907 + 000 в прямом и обратном направлении — удовлетворительное;

- км 354 + 000–365 + 000 в прямом направлении — удовлетворительное, в обратном направлении — предотказное;
- км 548 + 000–556 + 000 в прямом и обратном направлении — удовлетворительное;
- км 1138 + 000–1146 + 000 в прямом и обратном направлении — критическое.

С учетом полученных результатов были сформулированы рекомендации по восстановлению состояния на обследованных участках. Так, на участках, на которых было зафиксировано нормативное состояние, основным видом управляющих воздействий, оказываемых на дорожные конструкции, является устройство и последующее обновление слоев износа из щебеночно-мастичного асфальтобетона с периодичностью 4–5 лет. На участках с удовлетворительным состоянием также может быть реализована данная мера, но с учетом уменьшенного срока обновления слоев износа — в диапазоне 2–3 года. На участках предотказного состояния закладываются работы по ремонту покрытия с локальным усилением слоев основания. На участках, находящихся в критическом состоянии, необходимо выполнение работ по капитальному ремонту дорожной конструкции. Конкретные объемы и виды работ по восстановлению состояния дорожной одежды до требуемого эксплуатационного уровня определяются в ходе инженерных изысканий на проектном уровне, предполагающих определение модулей упругости конструктивных слоев дорожной одежды, выявление наиболее ослабленных элементов и соответствующие расчеты прочности дорожных конструкций.

**Обсуждение и заключение.** Предлагаемый подход является целесообразным при работе крупных организаций, реализующих управление состоянием вверенной им сети дорог. Существующая на текущий момент система назначения ремонтных работ на основе коэффициентов прочности, ровности и сцепления является чрезмерно жесткой, так как требует выполнения работ по капитальному ремонту при выполнении условия:

$$K_{\text{пр}} = I_{\text{факт}} / I_{\text{тр}} < 1.$$

где  $K_{\text{пр}}$  – коэффициент прочности дорожной одежды;  $I_{\text{факт}}$  – фактический упругий прогиб, регистрируемый при ударном нагружении;  $I_{\text{тр}}$  – требуемое значение упругого прогиба для соответствующей категории дороги.

Системы прогнозирования остаточного срока службы, традиционно используемые в программном обеспечении установок ударного нагружения FWD, такие как PRIMAX, ELMOD и прочие, могут быть эффективно использованы на проектном уровне при подборе конструкции дорожных одежд. Однако в этом случае система подбора конструкций дорожных одежд должна быть ориентирована на расчет и прогнозирование усталостных разрушений в слоях асфальтобетона и пластических деформаций по полосам наката. Во всех остальных случаях прямое применение этих подходов также требует адаптации для условий каждого государства или региона.

Следует отметить, что применение данного подхода сравнительно эффективно в случае принятия и корректировки планируемых решений о видах и сроках ремонтных работ. Так, например, в случаях участка «км 354 + 000–365 + 000» вместо изначально рассматриваемого собственником данной дороги решения о выполнении обязательного капитального ремонта по обоим направлениям было принято решение о восстановлении слоев износа в прямом направлении и выполнении ремонта обратного направления автомобильной дороги. Также, в отличие от метода прогнозирования остаточного срока службы по кривым выживаемости, данный подход требует меньшего количества статистических данных и уточнений моделей по результатам набора статистики.

В работе приведена новая концепция оценки остаточного ресурса нежестких дорожных одежд на основе данных натурных измерений упругого прогиба в центре чаши прогиба установкой ударного нагружения FWD. Достоинством данной модели является ее универсализм и возможность адаптации к любой инструментальной базе диагностики, предполагающей применение установок ударного нагружения FWD.

Разработана шкала состояний дорожной одежды в зависимости от фактического остаточного ресурса, определенного на основе натурных измерений. В данной шкале впервые введено понятие предотказного состояния для дорожной одежды, которому соответствуют значения остаточного ресурса 20–45 %. В зависимости от состояния сформулированы рекомендации по видам управляющих воздействий, которые способны обеспечить сохранность дорожной конструкции.

Установлено соответствие между дефектами, наблюдаемыми на поверхности покрытия нежесткой дорожной одежды, и значениями остаточного ресурса, определяемыми по данным инструментальных измерений. Установлено, что критические дефекты на покрытии соответствуют значениям остаточного ресурса 0–20 %.

### Список литературы/References

1. Pantuso A, Loprencipe G, Bonin G, Teltayev BB Analysis of Pavement Condition Survey Data for Effective Implementation of a Network Level Pavement Management Program for Kazakhstan. *Sustainability* 2019;11:901 <https://doi.org/10.3390/su11030901>.
2. Flora WF *Development of a Structural Index for Pavement Management: An Exploratory Analysis*. West Lafayette: Purdue University; 2009.

3. Fakhri M, Dezfoulian RS Pavement Structural Evaluation Based on Roughness and Surface Distress Survey Using Neural Network Model. *Construction and Building Materials*. 2019;204:768–780. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.142>
4. Tang F, Ma T, Zhang J, Guan Y, Chen L Integrating Three-Dimensional Road Design and Pavement Structure Analysis Based on BIM. *Automation in Construction*. 2020;113:103152. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103152>
5. Llopis-Castelló D, García-Segura T, Montalbán-Domingo L, Sanz-Benlloch A, Pellicer E Influence of Pavement Structure, Traffic, and Weather on Urban Flexible Pavement Deterioration. *Sustainability*. 2020;12:9717. <https://doi.org/10.3390/su12229717>
6. Haas R, Hudson R *Pavement Asset Management*. John Wiley & Sons; 2015. 432 p. <https://doi.org/10.1002/9781119038849>
7. Bryce J, Flintsch G, Katicha S, Diefenderfer B Enhancing Network-Level Decision Making through the Use of a Structural Capacity Index. *Transportation Research Record*. 2013;2366(1):64–70. <https://doi.org/10.3141/2366-08>
8. Calhoon T, Marasteanu M, McGrath S Are New Pavement Condition Indices Necessary for Long-Poor Pavements? *Transportation Research Record*. 2022;2676(11):186–193. <https://doi.org/10.1177/03611981221092004>
9. Hanandeh S Introducing Mathematical Modeling to Estimate Pavement Quality Index of Flexible Pavements Based on Genetic Algorithm and Artificial Neural Networks. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;16:e00991. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00991>
10. Elkins GE, Thompson T, Groeger J, Visintine BA, Rada GR *Reformulated Pavement Remaining Service Life Framework (Report No. FHWA-HRT-13-038)*. USA. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development.; 2013. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/13038/index.cfm> (accessed: 01.03.2026).
11. Kaya O, Citir N, Ceylan H, Kim S, Waid DR Development of Pavement Performance and Remaining Service Life Prediction Tools for Iowa Jointed Plain Concrete Pavement Systems. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. 2023;149(1):04022070. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.PVENG-1160>
12. Rada GR, Visintine BA, Bryce JM, Thyagarajan S, Elkins GE, Wheeler AF *Application and Validation of Remaining Service Interval Framework for Pavements (Report No. FHWA-HRT-16-053)*. USA: Federal Highway Administration; 2013. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/16053/index.cfm> (accessed: 01.03.2026).
13. Ekramnia T, Nasimifar M Development of a Methodological Tool for Treatment Prioritization in Network-Level Pavement Management System. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. 2022;148(1):04021069. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000329>
14. Das S, Siddagangaiah AK Multi-Objective Optimization of Imperfect Pavement Repair Policy: A Reliability-Based Approach. *Transportation Research Record*. 2022;2676(7):264–275. <https://doi.org/10.1177/03611981221077988>
15. Shahata K, El-Zahab S, Zayed T, Alfalah G Rehabilitation of Municipal Infrastructure Using Risk-Based Performance. *Automation in Construction*. 2022;140:104335. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104335>
16. Jannat G, Yuan XX, Shehata M Development of Regression Equations For Local Calibration of Rutting and IRI as Predicted by the MEPDG Models for Flexible Pavements Using Ontario’s Long-Term PMS data. *IJPE*. 2016;17:166–175. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.973024>
17. Islam KM, Gassman SL Predicting Flexible Pavement Distress and IRI Considering Subgrade Resilient Modulus of Fine-Grained Soils Using MEPDG. *Materials*. 2023;16:1126. <https://doi.org/10.3390/ma16031126>
18. Hurley CD *Asphalt Pavement Evaluation to Support the Calibration of the AASHTO MEPDG for South Carolina Conditions*. Master’s Thesis, Clemson University, Clemson, SC, USA; 2019. URL: [https://open.clemson.edu/all\\_theses/3198/](https://open.clemson.edu/all_theses/3198/) (accessed: 01.03.2026).
19. Philip B, Jassmi HA A Bayesian Approach towards Modelling the Interrelationships of Pavement Deterioration Factors. *Buildings*. 2022, 12, 1039. <https://doi.org/10.3390/buildings12071039>
20. Attoh-Okine NO Probabilistic Analysis of Factors Affecting Highway Construction Costs: A Belief Network Approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2002, 2002;29:369–374. <https://doi.org/10.1139/102-003>
21. Hatoum AA, Khatib JM, Barraj F, Elkordi A Survival Analysis for Asphalt Pavement Performance and Assessment of Various Factors Affecting Fatigue Cracking Based on LTPP Data. *Sustainability*. 2022;14:12408. <https://doi.org/10.3390/su141912408>
22. Justo-Silva R, Ferreira A, Flintsch G Review on Machine Learning Techniques for Developing Pavement Performance Prediction Models. *Sustainability*. 2021;13:5248. <https://doi.org/10.3390/su13095248>
23. Elshamy MMM, Tiraturyan AN, Uglova EV, Zakari M Development of the Non-Destructive Monitoring Methods of the Pavement Conditions Via Artificial Neural Networks. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1614(1):012099. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012099>

24. Elshamy MMM, Tiraturyan AN Using Application of an Artificial Neural Network System to Backcalculate Pavement Elastic Modulus. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020;2:84–93. <https://doi.org/10.36622/vstu.2020.2.46.006>

25. Osman SA, Almoshaogeh M, Jamal A, Alharbi F, Al Mojil A, Dalhat MA Intelligent Assessment of Pavement Condition Indices Using Artificial Neural Networks. *Sustainability*. 2023;15(1):561. <https://doi.org/10.3390/su15010561>

**Об авторах:**

**Тиратуриян Артем Николаевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильных дорог Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), [tiraturjan@list.ru](mailto:tiraturjan@list.ru)

**Абделаал Мохамед Эльсайед Рагаб**, аспирант Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), [mabdelaal@donstu.ru](mailto:mabdelaal@donstu.ru)

**Заявленный вклад соавторов:**

**А.Н. Тиратуриян:** научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

**М.Э.Р. Абделаал:** формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

**About the Authors:**

**Artem N. Tirturjan**, D.Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Highways of the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 1344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), [tiraturjan@list.ru](mailto:tiraturjan@list.ru)

**Mohamed Elsayed Ragab Abdelaal**, PhD student, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 1344003, Russian Federation), [ORCID](#), [mabdelaal@donstu.ru](mailto:mabdelaal@donstu.ru)

**Claimed contributorship:**

**AN Tirturjan:** scientific supervision, analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

**MER Abdelaal:** formation of the basic concept, aims of the research, calculations, preparation of the manuscript, formation of the conclusions.

**Conflict of interest statement:** the authors do not have any conflict of interest.

**All authors have read and approved the final version of manuscript.**

Поступила в редакцию / Received 10.03.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 24.03.2026

Принята к публикации / Accepted 05.04.2026