

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 625.7

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.115-127

Моделирование управляющих воздействий на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильных дорог

Артем Николаевич Тиратуриян

Донской государственный технический университет (ДГТУ); г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из сложных проблем управления дорожными активами является отсутствие единых интегральных показателей их состояния, учитывающих одновременно изменение продольной ровности покрытия, визуального состояния и общего модуля упругости на эксплуатационной стадии жизненного цикла (ЖЦ) автомобильной дороги. Их отсутствие приводит к невозможности эффективного моделирования различных сценариев изменения эксплуатационного состояния дороги при осуществлении управляющих воздействий в виде работ по содержанию, ремонту капитальному ремонту. Цель исследования — выработка данного критерия и формулирование основ для моделирования различных сценариев применения управляющих воздействий на эксплуатационной стадии ЖЦ.

Материалы и методы. В качестве основного показателя состояния автомобильной дороги на эксплуатационной стадии ЖЦ используется интегральный уровень сохранности, представляющий собой произведение долей участка автомобильной дороги, находящихся в удовлетворительном состоянии, по показателям — общий модуль упругости на поверхности дорожной одежды, продольная ровность и визуальное состояние. Для обоснования применимости данного показателя и развития методики моделирования управляющих воздействий используется аппарат теории надежности и математической статистики.

Результаты. На основе зависимостей, характеризующих изменение каждого из показателей в течение срока службы с учетом предположения о нормальном характере их распределения, получена проектная кривая изменения интегрального уровня сохранности для автомобильных дорог с интенсивным движением. Рассмотрены различные сценарии назначения управляющих воздействий и показано их влияние на величину интегрального уровня сохранности автомобильной дороги.

Выводы. Установлено, что для ряда случаев восстановление потребительских свойств автомобильной дороги без восстановления несущей способности не обеспечит продление срока службы. Выполнено моделирование различных сценариев назначения управляющих воздействий в виде работ по содержанию, ремонту и капитальному ремонту. Определены перспективы применения предложенного подхода, связанные с использованием аппарата теории эффективности технических систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автомобильные дороги, эксплуатационная стадия жизненного цикла, уровень сохранности, управляющие воздействия, сценарии, эксплуатационные параметры, стратегии ремонтных работ

Благодарности. Исследования проводятся в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (заявка МК-242.2022.4). Автор выражает благодарность рецензентам за время и силы, потраченные на рассмотрение данной статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тиратуриян А.Н. Моделирование управляющих воздействий на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильных дорог // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 1. С. 115–127. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.115-127

Автор, ответственный за переписку: Артем Николаевич Тиратуриян, tiraturjan@list.ru.

Modelling of control actions at the operational stage of the life cycle of roads

Artem N. Tiraturyan

Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the complex problems of road asset management is the lack of unified “integral” indicators of their condition, which simultaneously take into account the change in the longitudinal smoothness of the road surface, visual

condition, and the general modulus of elasticity at the operational stage of the road life cycle. Their absence leads to the impossibility of effective modelling of various scenarios of changes in the operational condition of the road when various kinds of control actions in the form of maintenance, repair and overhaul are carried out. The purpose of this study is to develop this criterion and formulate the basis for modelling various scenarios for the application of control actions at the operational stage of the life cycle.

Materials and methods. As the main indicator of the road condition at the operational stage of the life cycle, it is proposed to use the integral level of safety, which is the product of the shares of the road section that are in satisfactory condition according to the indicators — the general modulus of elasticity on the surface of the pavement, longitudinal smoothness and visual condition. To substantiate the applicability of this indicator and develop a methodology for modelling control actions, the apparatus of the theory of reliability and mathematical statistics is used.

Results. Based on the dependencies characterizing the change in each of these indicators during the service life, taking into account the assumption of the normal nature of their distribution, the design curve of change of the integral level of safety for highways with heavy traffic (> 5,000,000 applications of the design load for the service life) was obtained. Various scenarios for assigning control actions are considered and their influence on the value of the integral level of road safety is shown. It is shown that for a number of cases, the restoration of the consumer properties of the road without the restoration of the bearing capacity will not provide an extension of the service life. Modelling of various scenarios for the assignment of control actions in the form of maintenance, repair and overhaul work was carried out based on the indicator — the integral level of safety.

Conclusions. It is shown that for a number of cases the restoration of the consumer properties of the road without the restoration of the bearing capacity will not provide service life extension. Modelling of various scenarios for the assignment of control actions in the form of maintenance, repair and overhaul has been carried out. The prospects of application of the given approach connected with the use of the apparatus of the theory of efficiency of technical systems are determined.

KEYWORDS: highways, operational stage of the life cycle, level of safety, control actions, scenarios, operational parameters, repair strategies.

Acknowledgements. The research is carried out within the framework of the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists — candidates of science (application MK-242.2022.4). The author also expresses his sincere gratitude to the respected reviewers for the time and effort spent on the review of this article.

FOR CITATION: Tiraturyan A.N. Modelling of control actions at the operational stage of the life cycle of roads. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(1):115-127. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.115-127 (rus.).

Corresponding author: Artem N. Tiraturyan, tiraturjan@list.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие механизмов эффективного управления состоянием автомобильных дорог является важной технической и экономической задачей. Ее сложность продиктована тем, что для автомобильной дороги достаточно трудно сформулировать четкий критерий отказа в форме «все или ничего», так как даже необеспеченность фактической жесткости дорожной конструкции может не снизить фактическую безопасность движения, если ремонтные мероприятия выполняются с периодом меньше директивного срока. Однако это многократно увеличивает финансовые затраты на обеспечение нормативного состояния автомобильной дороги, что делает процесс постоянного выполнения ремонтов малоэффективным. Также нельзя не отметить, что в соответствии с Постановлением Правительства от 30.05.2017 № 658 срок между ремонтами на автомобильных дорогах I–IV категории составляет 12 лет, а между капитальными ремонтами — 24 года, что не позволяет проводить ремонтные работы с привлечением бюджетного финансирования вне пределов установленных сроков. Таким образом, задача рационального и эффективного планирования ремонтных работ — непростая и требует привлечения новых подходов и показателей, характеризующих состояние автомобильной дороги (в первую очередь ее основного элемента — дорожной одежды), а также разработки подхода к оценке эффективности реализации различных видов управляющих воздействий.

Решению подобной задачи посвящено большое количество трудов отечественных и зарубежных ученых [1–5]. Так, в практике РФ длительное время основной упор при выборе и планировании мероприятий по восстановлению эксплуатационных качеств автомобильных дорог делался на систему коэффициентов обеспеченности расчетной скорости K_{pci} ($i = 1–9$), где каждый коэффициент характеризовал влияние определенного структурного или эксплуатационного фактора автомобильной дороги на снижение расчетной скорости пользователем [6–9]. В последние годы явно наметилась тенденция возвращения к более простым показателям назначения вида управляющих воздействий. В частности, капитальный ремонт назначают, когда:

$$K_{np} < 1,$$

где $K_{np} = E_{\phi} / E_{tr}$; E_{ϕ} — фактический общий модуль на поверхности дорожной одежды автомобильной дороги; E_{tr} — требуемый общий модуль упругости.

Ремонт назначается в случае, когда фактическое значение международного индекса продольной ровности IRI превышает требования соответствующего ГОСТ. Вместе с тем охарактеризовать состояние дороги в терминах «больше или меньше нормативного показателя» бывает сложно, так как дорога, удовлетворяющая требованиям по фактической ровности, может не соответствовать требованию по коэффициенту запаса прочности, и наоборот. Также, являясь линейно протяженной конструкцией, автомобильная дорога может характеризоваться достаточно высокой разнородностью показателей

по длине, что приводит либо к чрезвычайно высокой дискретности назначения характерных участков и видов работ на них, либо к необоснованному назначению конкретного вида ремонтных работ.

В мировой практике применяемые показатели состояния дорожной одежды автомобильной дороги, как правило, разделяются на эксплуатационные, структурные и комбинированные [10]. Примерами эксплуатационных показателей служат признанный во всем мире индекс продольной ровности покрытия — IRI, показатель комфортности движения — RCI (ride comfort index), число движения — RN (ride number). К структурным показателям можно отнести показатели индекса структурной жесткости — SSIF (structural strength index), структурное число — SN (structural number), индекс структурного состояния — SCI (structural condition index) [11–15].

К комбинированным показателям относят также показатели, учитывающие виды дефектов и их веса, т.е. тяжесть каждого конкретного дефекта. В качестве таких показателей можно выделить индекс состояния дорожной одежды — PCI (pavement condition index), индекс качества дорожной одежды — PQI (pavement quality index), индекс структурной адекватности — SCI (structural adequacy index), индекс разрушений покрытия — SDI (surface distress index) [16–21].

PQI — один из наиболее интересных комбинированных показателей, рассчитывается следующим образом:

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

где RQI — индекс качества движения (ride quality index); SR — рейтинг покрытия.

Показатели, учитываемые в данной зависимости, определяются в соответствии с методикой MnDOT [22–24]. Индекс качества движения RQI и рейтинг покрытия SR оцениваются по пяти- и четырехбалльной шкале соответственно в зависимости от фактической ровности покрытия (IRI), а также видов и весов дефектов, наблюдаемых на покрытии. С точки зрения теории надежности такой вид зависимости описывает надежность технической системы, состоящей из двух равнозначных элементов.

Все описанные выше показатели характеризуют состояние дороги на сетевом уровне, т.е. служат в первую очередь для решения задач планирования сроков и видов управляющих воздействий на эксплуатационной стадии жизненного цикла (ЖЦ) автомобильной дороги. Вместе с тем как в отечественной, так и в мировой практике не прослеживается единых подходов к оценке эффективности различных стратегий управляющих воздействий на эксплуатационное состояние автомобильных дорог, учитывающих интегральные критерии их состояния.

Цель исследования — выработка теоретических основ нового подхода к анализу эксплуатационной стадии ЖЦ дороги и анализ различных сценариев назначения управляющих воздействий как в проектом случае, так и для фактически экс-

плуатируемой автомобильной дороги. Гипотеза исследования заключается в том, что эффективное и рациональное планирование различных сценариев обеспечения эксплуатационной надежности автомобильной дороги должно базироваться на моделировании различных видов управляющих воздействий на основе интегрального показателя сохранности автомобильной дороги, объединяющего такие факторы, как ее коэффициент прочности, продольную ровность, средний балл по визуальной оценке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Состояние дороги будем описывать на основе интегрального уровня сохранности $P_{\text{сох}}$ [25–28], представляющего собой произведение частных показателей, т.е. доли протяженности участков автомобильных дорог, находящихся в удовлетворительном состоянии по показателю коэффициент прочности $P_{\text{проч}}$, показателю фактическая продольная ровность покрытия $P_{\text{ров}}$ и показателю фактическое визуальное состояние $P_{\text{в.оц}}$:

$$P_{\text{сох}} = P_{\text{проч}} \cdot P_{\text{ров}} \cdot P_{\text{в.оц}};$$

$$P_{\text{проч}} = 1 - \frac{L_{\text{неуд.пр}}}{L};$$

$$P_{\text{ров}} = 1 - \frac{L_{\text{неуд.ров}}}{L};$$

$$P_{\text{в.оц}} = 1 - \frac{L_{\text{неуд.в.оц}}}{L},$$

где $L_{\text{неуд.пр}}$ — протяженность участка с неудовлетворительным коэффициентом прочности ($K_{\text{пр}} < 1$); $L_{\text{неуд.ров}}$ — протяженность участка с неудовлетворительным показателем ровности по IRI ($IRI > 4$); $L_{\text{неуд.в.оц}}$ — протяженность участка с неудовлетворительным средним баллом по визуальной оценке ($B_{\text{ср}} < 3$).

Предлагаемая категоризация состояний, исходя из которых назначаются управляющие воздействия, приведена в табл. 1.

Практическое применение группы данных показателей в задаче оценки состояния автомобильной дороги и назначения управляющих воздействий требует прогнозирования изменения как частных параметров сохранности автомобильной дороги, так и интегрального уровня ее сохранности. Для этой цели в предположении о нормальности закона изменения этих параметров будем использовать стандартную зависимость:

$$P = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{X - \bar{X}}{\sigma_{\text{ст}}}\right), \quad (1)$$

где X — наблюдаемое значение характеристики; \bar{X} — среднее значение характеристики; $\sigma_{\text{ст}}$ — стандартное отклонение.

В качестве наблюдаемого и среднего значения могут быть использованы значения коэффициента прочности, показателя продольной ровности покры-

Табл. 1. Интегральный уровень сохранности и рекомендуемые виды управляющих воздействий

Table 1. Integral level of safety and recommended types of control actions

Интегральный уровень сохранности Integral level of safety	Диапазон значений Value range	Управляющее воздействие Control variable
Отличный Very good	1–0,86	Дорожная одежда не имеет повреждений. Допускается выполнение работ по содержанию в соответствии с нормативными сроками или с превышением нормативных сроков The pavement has no damage. It is allowed to perform maintenance work in accordance with the regulatory deadlines, or in excess of the regulatory deadlines
Хороший Good	0,85–0,71	Дорожная одежда имеет незначительные дефекты покрытия. Выполнение работ по содержанию осуществляется в соответствии с нормативными сроками The pavement has minor pavement defects. Maintenance work is carried out in accordance with the regulatory deadlines
Удовлетворительный Satisfactorily	0,70–0,56	Дорожная одежда имеет дефекты, связанные с износом верхних слоев покрытий. Требуется проведение работ по восстановлению верхнего слоя покрытия The pavement has defects associated with the wear of the upper layers of coatings. Requires work to restore the top layer of the coating
Неудовлетворительный Unsatisfactory	0,55–0,41	На покрытии дорожной одежды присутствуют дефекты, связанные с потерей несущей способности покрытия и основания. Требуется выполнения работ по ремонту с локальным усилением слоев основания There are defects on the pavement coating associated with the loss of the bearing capacity of the pavement and base. Requires repair work with local strengthening of the base layers
Низкий Low	0,40–0,26	На покрытии присутствуют критические дефекты в виде сетки трещин, глубокой колеи, снижена несущая способность дорожной конструкции. Необходим капитальный ремонт There are critical defects on the pavement in the form of a network of cracks, deep ruts, and the bearing capacity of the road structure is reduced. A major overhaul is required
Критически низкий Very low	0,25–0	На покрытии присутствуют критические дефекты в виде сетки трещин, глубокой колеи, просадок, снижена несущая способность всех слоев дорожной одежды. Необходимо проведение капитального ремонта с полной разборкой существующей конструкции There are critical defects on the pavement in the form of a network of cracks, deep ruts, subsidence, and the bearing capacity of all layers of the pavement is reduced. It is necessary to carry out a major overhaul with a complete disassembly of the existing structure

тия дороги в единицах IRI и среднего балла по визуальной оценке.

На данный момент прогнозирование изменения несущей способности дорожной конструкции может выполняться по следующей зависимости:

$$E_{тр} = \sqrt{\frac{P}{600}} \cdot 98,65 \times \left(\lg \left(0,7 \cdot N_p \cdot T_{плг} \frac{q^{T_{сл}} - 1}{(q-1)q^{T_{сл}-1}} \right) - C \right), \quad (2)$$

где p — расчетное давление ($p = 800$ кПа); N_p — расчетная интенсивность движения, авт/сут; $T_{плг}$ — количество расчетных дней в году; q — коэффициент прироста интенсивности движения; $T_{сл}$ — срок службы дорожной конструкции.

Следует отметить, что дальнейшие выкладки и кривые изменения состояния частных показателей сохранности будут построены для дорог с достаточно высокой интенсивностью движения, характеризующей суммарным числом приложений расчетной нагрузки более 10 млн приложений за срок службы. На основе данной зависимости были рассчитаны значения модулей упругости на каждый год эксплуатации в течение всего 24-летнего периода ($E_{1год}^{пр} \dots E_{Тсл}$). После чего рассчитаны значения изменения коэффициента прочности на каждый год эксплуатации $K_{пр} = \frac{E_{1год}^{пр}}{E_{Тсл}}$. График изменения коэффициентов прочности и надежности приведен на рис. 1, 2.

В качестве проектной зависимости для построения аналогичной кривой изменения продольной ровности покрытия принята зависимость (3) по СТО АВТОДОР 2.28–2016 «Прогнозирование

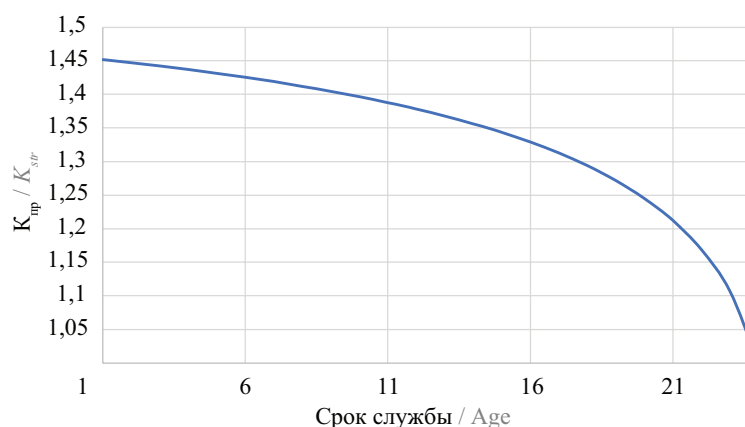


Рис. 1. Кривая снижения фактического коэффициента прочности на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги

Fig. 1. Curve of the decrease in the actual coefficient of strength at the operational stage of the life cycle of the highway

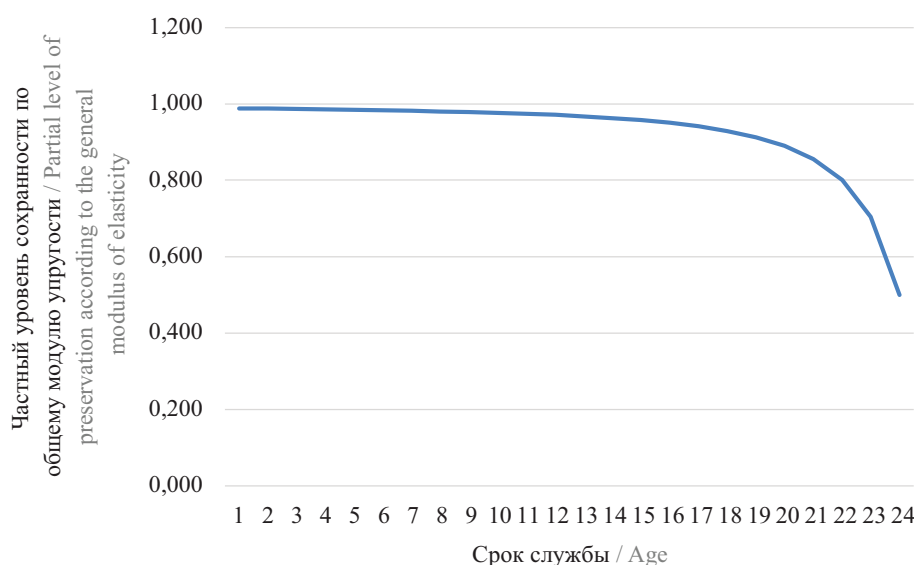


Рис. 2. Кривая снижения фактического коэффициента надежности на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильной дороги

Fig. 2. Curve of decrease in the actual coefficient of strength at the operational stage of the life cycle of the highway

состояния эксплуатируемых автомобильных дорог государственной компании «Автодор»):

$$IRI = IRI_0 + a \sum_{i=1}^{T_{ca}} N_{факт}^b, \quad (3)$$

где $N_{факт}$ — фактическое число проходов автомобилей; a, b — эмпирические коэффициенты, принимаемые в зависимости от материала слоев основания дорожной конструкции, для асфальтобетонных слоев, лежащих на укрепленном основании, — 0,112 и 0,874 соответственно; для асфальтобетонных слоев, лежащих на неукрепленном основании, — 0,096 и 1,017 соответственно. Прогнозные кривые изменения продольной ровности покрытия и частного уровня надежности по продольной ровности приведены на рис. 3, 4.

Прогнозирование среднего балла по визуальной оценке — сложная задача, так как зависимостей для прогнозирования дефектов определенных видов

с учетом показателей прочности или ровности в строительной практике нет. Однако может быть использована взаимосвязь между показателем остаточного ресурса и видом дефектов на поверхности покрытия, установленная в СТО АВТОДОР 2.4–2013 (табл. 2).

Зависимость, характеризующая изменение среднего балла по визуальной оценке, в течение срока службы автомобильной дороги, построенная на основе данных табл. 1, приведена на рис. 5. Рассчитанная согласно данному графику надежность в соответствии с зависимостью (3) представлена на рис. 6.

Каждый из приведенных графиков характеризует проектное изменение частного показателя сохранности автомобильной дороги без учета влияния возможных управляющих воздействий. Определив их произведение, получим проектную кривую изменения интегрального уровня сохранности автомобильных дорог с высокой интенсивностью движения (рис. 7).

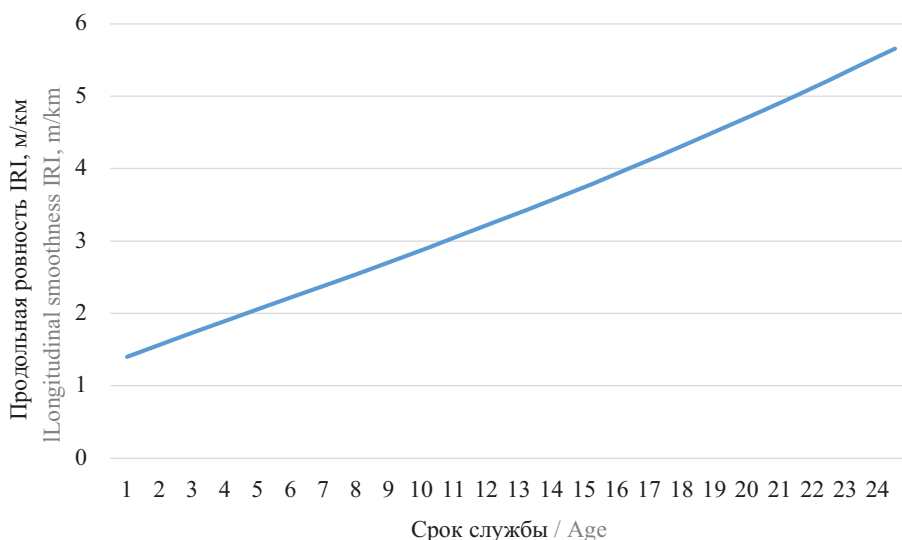


Рис. 3. Прогноз продольной ровности покрытия дорожной одежды (при начальной ровности IRI = 1,2 м/км, средней ровности IRI_{ср} = 4 м/км)

Fig. 3. Forecast of the longitudinal smoothness of the pavement (with initial smoothness IRI = 1.2 m/km, average smoothness IRI_{sr} = 4 m/km)

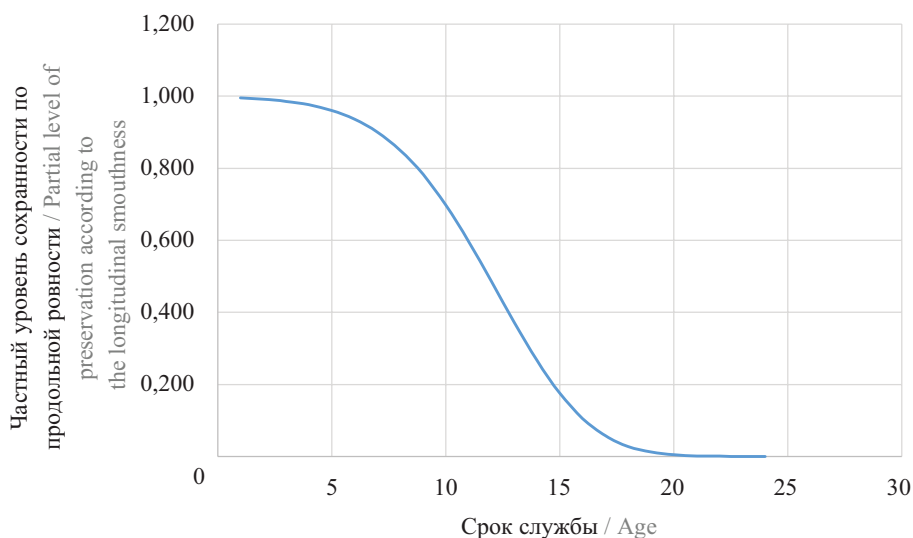


Рис. 4. Изменение надежности дорожной одежды по продольной ровности покрытия (при начальной ровности IRI = 1,2 м/км, средней ровности IRI_{ср} = 4 м/км)

Fig. 4. Change in the reliability of pavement along the longitudinal smoothness of the pavement (with initial smoothness IRI = 1.2 m/km, average smoothness IRI_{sr} = 4 m/km)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим возможность моделирования различных вариантов управляющих воздействий на изменение срока службы эксплуатируемого участка автомобильной дороги. Для этого будем предполагать, что выполнение работ по ремонту покрытия будет восстанавливать продольную ровность покрытия и визуальное состояние до 1. Выполнение работ по замене слоев износа в соответствии с работой [29] на 5-й год службы автомобильной дороги обеспечивает улучшение показателя IRI на 0,4–0,5 м/км.

В качестве основных будем рассматривать следующие варианты:

Стратегия 1 — не выполняются работы по обеспечению сохранности дорожной одежды.

Стратегия 2 — базовый проектный ремонт на 12-й год срока службы.

Стратегия 3 — усовершенствованный проектный — выполнение восстановления слоев износа каждые 5 лет, ремонт на 12-й год, последующее проведение работ по устройству слоев износа каждые 5 лет.

Стратегия 4 — осуществление работ по содержанию дорожной одежды каждые 5 лет, без выполнения ремонта.

Результаты моделирования каждого описанного сценария представлены на рис. 8.

Табл. 2. Зависимость остаточного ресурса от среднего балла по визуальной оценке

Table 2. Dependence of the residual resource on the average score according to visual assessment

Вид дефекта Defect type	B_{av}^{cp}	Остаточный ресурс, % Residual life, %	Срок эксплуатации Service life
Отсутствует Missing	5	100	1
Одиночные поперечные трещины на расстоянии 20–40 м Single transverse cracks at a distance of 20–40 m	$\geq 4,8$	85	4
Отдельные поперечные трещины на расстоянии 10–20 м; продольная центральная трещина; колейность до 15 мм Separate transverse cracks at a distance of 10–20 m; Longitudinal central crack; Rutting up to 15 mm	$\geq 4,5$	75	6
Редкие поперечные трещины на расстоянии 8–10 м; колейность до 20 мм Rare transverse cracks at a distance of 8–10 m; Rutting up to 20 mm	$\geq 4,0$	65	8
Редкие поперечные трещины на расстоянии 5–8 м; продольные боковые трещины; колейность до 25 мм Rare transverse cracks at a distance of 5–8 m; Longitudinal side cracks; Rutting up to 25 mm	$\geq 3,5$	45	13
Частые поперечные трещины на расстоянии 3–5 м; колейность до 30 мм; одиночная сетка трещин на площади более 5 % Frequent transverse cracks at a distance of 3–5 m; Rutting up to 30 mm; Single grid of cracks over an area of more than 5 %	$\geq 3,0$	25	18
Одиночная сетка трещин на площади более 5 % Single grid of cracks over an area of more than 5 %	$< 2,5$	0	24

Применение предлагаемого подхода для моделирования на основе показателя интегрального уровня сохранности позволяет учитывать негативное влияние снижения общего модуля упругости дорожной одежды, которое не устраняется выполнением работ по ремонту и содержанию автомо-

бильной дороги. Видно, что стратегия 3 допускает возможность выполнения на 24-й год еще одного ремонта вместо капитального ремонта, однако его эффективность предположительно будет ограничена 3–4 годами в связи с низким значением фактической прочности. В таком случае решение о по-

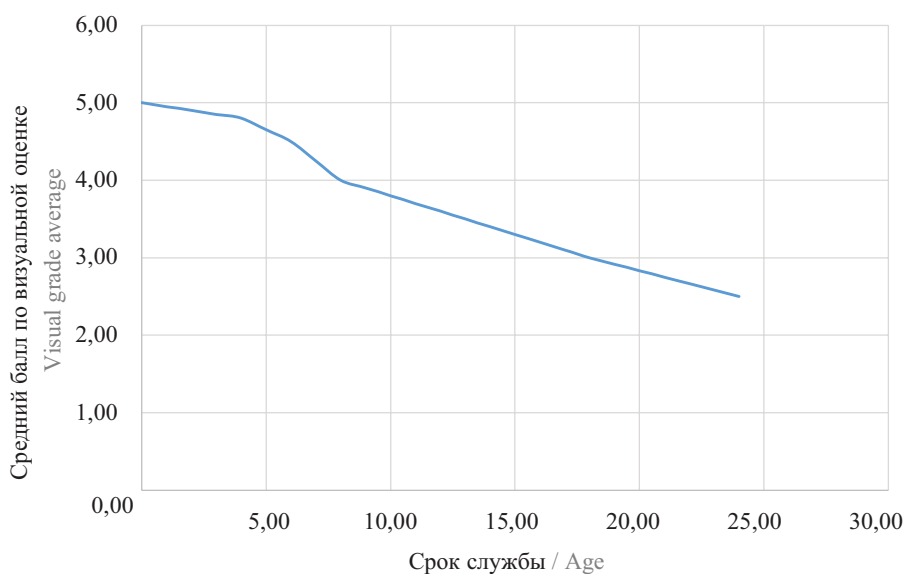


Рис. 5. Проектная кривая изменения среднего балла по визуальной оценке состояния покрытия

Fig. 5. Design curve of change in the average score, according to visual assessment, the state of the coating

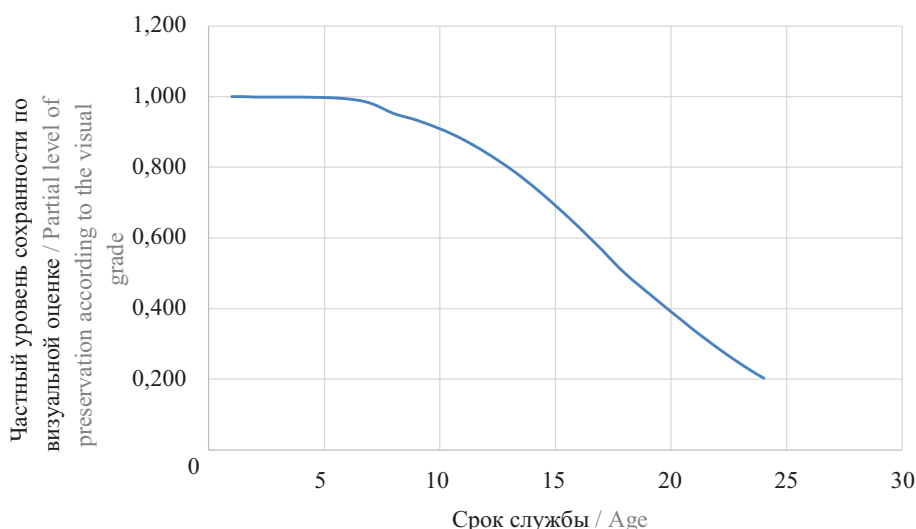


Рис. 6. Проектная кривая изменения надежности по визуальной оценке состояния покрытия (при среднем значении балла по визуальной оценке 3)

Fig. 6. Design curve of change in reliability, according to visual assessment, the state of the coating (with an average visual assessment score of 3)

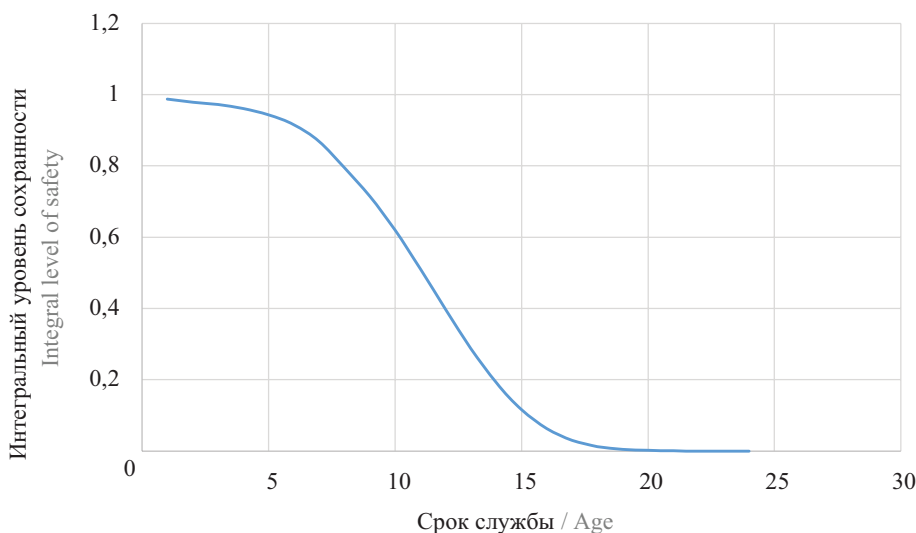


Рис. 7. Проектная кривая изменения интегрального уровня сохранности автомобильной дороги в течение ее срока службы

Fig. 7. Design curve of changes in the integral level of safety of the road during its service life

добном способе продления межремонтного срока службы целесообразно принимать на основе технико-экономического сравнения дисконтированных затрат, связанных с проведением соответствующих ремонтных работ.

Рассмотрим различные стратегии восстановления для эксплуатируемого участка. В качестве тестового выбран эксплуатируемый участок автомобильной дороги М-4 «Дон». Данный участок дороги был реконструирован в 2013 г. После окончания реконструкции на нем осуществлена оценка интегрального уровня сохранности на 1-й год срока службы, а также на 2-й и 4-й год его эксплуатации (соответственно в 2015 и 2017 гг.). Результаты оценки интегральной сохранности приведены в табл. 3.

Очевидно, что в наибольшей степени отклонение фактического интегрального уровня сохранности от проектной кривой связано с ухудшением общего модуля упругости (рис. 9). Замена слоев износа, как и выполнение внепланового ремонта, не позволит вернуть функционирование конструкции в «проектное» русло, так как улучшение продольной ровности покрытия и визуального состояния будет нивелироваться снижением общего модуля упругости, учитываемого в дальнейших вычислениях в виде регрессионной зависимости.

В качестве наиболее предпочтительных вариантов выглядит выполнение внепланового капитального ремонта на 7-й год эксплуатации автомобильной дороги с последующим восстановлением

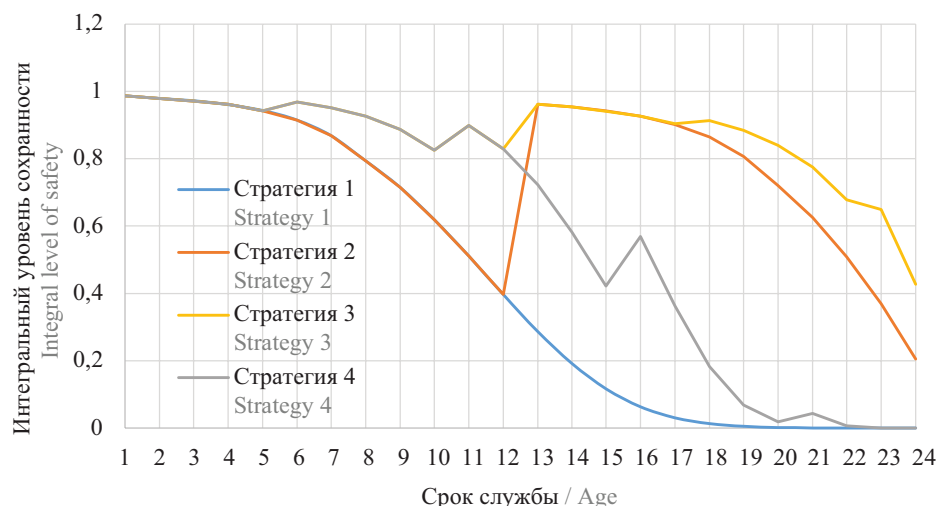


Рис. 8. Моделирование различных сценариев обеспечения сохранности автомобильной дороги на эксплуатационной стадии жизненного цикла при изменении эксплуатационных показателей автомобильной дороги в проектных рамках
Fig. 8. Modelling of various scenarios for ensuring the safety of the highway at the operational stage of the life cycle when the operational indicators of the highway change within the project framework

Табл. 3. Данные об уровне сохранности эксплуатируемого участка дороги М-4 «Дон»
Table 3. Data on the level of preservation of the maintained section of the M4 “Don” highway

Год Year	$P_{проч}$ P_{str}	$P_{ров}$ P_{rowg}	$P_{в.оц}$ $P_{vis.c}$	$P_{сох}$ P_{saf}
2013	1,000	1,000	0,999	1,00
2015	0,990	0,992	0,999	0,98
2017	0,860	0,976	0,999	0,84

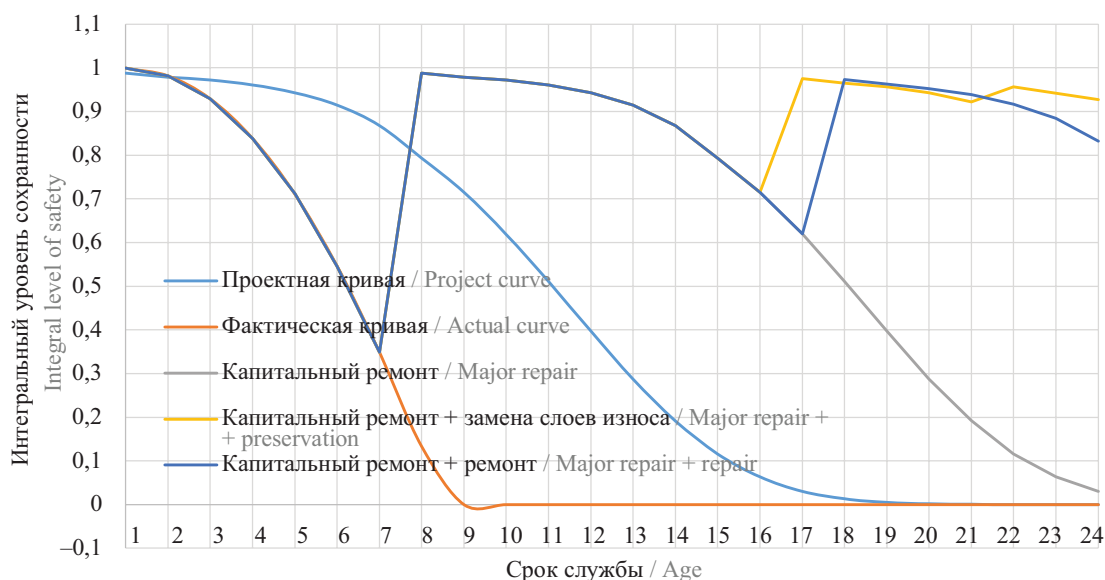


Рис. 9. Моделирование различных сценариев обеспечения сохранности автомобильной дороги на эксплуатационной стадии жизненного цикла с учетом фактического состояния участка автомобильной дороги М-4 «Дон»
Fig. 9. Modelling of various scenarios for ensuring the safety of the highway at the operational stage of the life cycle, taking into account the actual state of the section of the M4 “DON” highway

изношенных слоев покрытия в рамках работ по замене слоев износа на 16-й и 22-й год эксплуатации,

либо выполнение работ по капитальному ремонту на 7-й год эксплуатации и ремонту на 17-й год.

Окончательно решение может быть принято только на основе экономических расчетов.

С помощью предложенного подхода впервые в отечественной практике разработаны различные варианты обеспечения сохранности автомобильной дороги на основе интегрального уровня сохранности. Главным достоинством этого подхода является его соответствие традиционным практикам обследования автомобильных дорог, принятых в РФ, а также учет основных показателей как структурного, так и эксплуатационного состояния дорожной одежды автомобильной дороги, на уровне современных структурных и комбинированных показателей состояния дорог, используемых в мировой практике. Ключевые перспективы развития данного подхода связаны с учетом экономического эффекта от различных видов управляющих воздействий, а также с постановкой оптимизационной задачи поиска наиболее рационального сценария обеспечения долговечности автомобильной дороги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный новый показатель состояния автомобильных дорог и подход к прогнозированию на его основе управляющих воздействий в течение эксплуатационной стадии ЖЦ автомобильной дороги имеет ряд преимуществ перед существующими. Показано, что эффективное и рациональное планирование разных сценариев обеспечения эксплуатационной надежности автомобильной дороги может базироваться на моделировании различных видов управляющих воздействий на основе интегрального показателя сохранности автомобильной дороги, объединяющего такие факторы, как коэффициент прочности, продольная ровность, средний балл по визуальной оценке. В первую очередь, этот

показатель учитывает вероятность безотказной работы обследуемого участка автомобильной дороги, опираясь именно на статистическую оценку, рассчитанную по основным эксплуатационным свойствам любой дороги — визуальному состоянию, общему модулю упругости на поверхности и продольной ровности. Также данный показатель целесообразно отнести к комбинированным видам как объединяющий в себе структурные характеристики дорожной одежды автомобильной дороги — жесткость и виды дефектов, так и чисто пользовательский параметр — продольную ровность покрытия.

Разработанный на базе моделей изменения общего модуля упругости, продольной ровности и визуального состояния автомобильной дороги подход к прогнозированию выполнения различных видов ремонтных работ позволяет смоделировать их влияние на величину интегрального уровня сохранности дороги. При этом выгодным его отличием от других прогнозных методов является постоянный учет снижения общего модуля упругости на поверхности дорожной одежды автомобильной дороги, как показателя, не восстанавливаемого в ходе работ по ремонту и содержанию, в виде замены слоев износа или восстановления изношенного покрытия. Перспективность применения данного показателя и подхода к моделированию различных сценариев управляющих воздействий обусловлена тем, что она может быть увязана с аппаратом теории надежности, т.е. по мере накопления сведений об изменении эксплуатационного состояния автомобильной дороги может быть применен аппарат анализа эффективности функционирования технических систем [30]. Также в рамках каждого из сценариев могут быть в значительной степени детализированы финансовые оценки различных стратегий управляющих воздействий и выбраны оптимальные.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Леонович И.И., Новгородский Я.Я., Буртыль Ю.В.* Транспортно-эксплуатационное состояние сети республиканских автомобильных дорог и основные направления повышения их качества // Вестник Белорусского национального технического университета. 2008. № 6. С. 56–63. EDN VVALSN.
2. *Красиков О.А.* Оптимальные значения // Автомобильные дороги. 2021. № 9 (1078). С. 134–137. EDN ZZMBRJ.
3. *Кириллов А.М., Завьялов М.А.* Прогнозирование остаточного срока службы асфальтобетонных покрытий // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 3 (114). С. 356–367. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.3.356-367
4. *Elhadidy A.A., El-Badawy S.M., Elbeltagi E.E.* A simplified pavement condition index regression model for pavement evaluation // International Journal of Pavement Engineering. 2021. Vol. 22. Issue 5. Pp. 643–652. DOI: 10.1080/10298436.2019.1633579
5. *Fakhri M., Dezfoulian R.S.* Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 204. Pp. 768–780. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.142
6. *Васильев А.П.* Целевые показатели оценки результативности модернизации, ремонта и содержания автомобильных дорог // Наука и техника в дорожной отрасли. 2005. № 1 (32). С. 5–8. EDN OIJYPF.
7. *Васильев А.П., Ефименко В.Н.* К обоснованию протяжения автомобильных дорог, подлежащих реконструкции, модернизации, капитальному ремонту и ремонту, в субъектах федерации // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 6 (47). С. 157–167. EDN TBZNID.

8. Углова Е.В., Саенко С.С. Обзор инструментов управления состоянием дорожных конструкций // Транспортные сооружения. 2016. Т. 3. № 1. С. 6. EDN WKTSFF.
9. Тиратурян А.Н., Белоусов Е.С., Шамалов В.Ю. Имитационное моделирование ухудшения эксплуатационного состояния нежестких дорожных конструкций на основе вероятностного подхода // Инженерный вестник Дона. 2016. № 3 (42). С. 65. EDN YGSTBV.
10. Jiang X., Gabrielson J., Huang B., Bai Y., Polaczyk P., Zhang M. et al. Evaluation of inverted pavement by structural condition indicators from falling weight deflectometer // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 319. Pp. 125991. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125991
11. Rabbi M.F., Mishra D. Using FWD deflection basin parameters for network-level assessment of flexible pavements // International Journal of Pavement Engineering. 2021. Vol. 22. Issue 2. Pp. 147–161. DOI: 10.1080/10298436.2019.1580366
12. Jing C., Zhang J., Song B. An innovative evaluation method for performance of in-service asphalt pavement with semi-rigid base // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 235. P. 117376. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117376
13. Vyas V., Singh A.P., Srivastava A. Entropy-based fuzzy SWOT decision-making for condition assessment of airfield pavements // International Journal of Pavement Engineering. 2021. Vol. 22. Issue 10. Pp. 1226–1237. DOI: 10.1080/10298436.2019.1671590
14. Bosurgi G., Pellegrino O., Sollazzo G. Pavement condition information modelling in an I-BIM environment // International Journal of Pavement Engineering. 2022. Vol. 23. Issue 13. Pp. 4803–4818. DOI: 10.1080/10298436.2021.1978442
15. Vyas V., Singh A.P., Srivastava A. Prediction of asphalt pavement condition using FWD deflection basin parameters and artificial neural networks // Road Materials and Pavement Design. 2021. Vol. 22. Issue 12. Pp. 2748–2766. DOI: 10.1080/14680629.2020.1797855
16. Wang J., Chen M., Gao W., Guo Z., Liu Y. A comparison of network level pavement condition assessment in road asset management // International Journal of Transportation Engineering and Technology. 2020. Vol. 6. Issue 3. P. 95. DOI: 10.11648/j.ijtet.20200603.14
17. Kumar R., Suman S.K. Development of overall pavement condition index for maintenance strategy selection for Indian highways // International Journal of System Assurance Engineering and Management. 2022. Vol. 13. Issue 2. Pp. 832–843. DOI: 10.1007/s13198-021-01344-z
18. Issa A., Sammaneh H., Abaza K. Modeling pavement condition index using cascade architecture: classical and neural network methods // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2022. Vol. 46. Issue 1. Pp. 483–495. DOI: 10.1007/s40996-021-00678-9
19. Han C., Fang M., Ma T., Cao H., Peng H. An intelligent decision-making framework for asphalt pavement maintenance using the clustering-PageRank algorithm // Engineering Optimization. 2020. Vol. 52. Issue 11. Pp. 1829–1847. DOI: 10.1080/0305215X.2019.1677636
20. Ndume V., Mlavi E., Mwaipungu R. Development of road pavement condition index using combined parameters // Civil Engineering Research. 2020. Vol. 10. Issue 3. Pp. 53–62. DOI: 10.5923/j.jce.20201003.01
21. Kravcovas I., Vaitkus A., Kleizienė R. Comparison of pavement performance models for urban road management system // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 2020. Vol. 15. Issue 3. Pp. 111–129. DOI: 10.7250/bjrbe.2020-15.487
22. Mubaraki M., Sallam H. The most effective index for pavement management of urban major roads at a network level // Arabian Journal for Science and Engineering. 2021. Vol. 46. Issue 5. Pp. 4615–4626. DOI: 10.1007/s13369-020-05122-0
23. Titi H., Qamhia I.I., Ramirez J., Tabatabai H. Long-term performance of flexible pavements constructed on recycled base layers // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2022. Vol. 2676. Issue 11. Pp. 206–222. DOI: 10.1177/03611981221092000
24. Nabipour N., Karballaezadeh N., Dineva A., Mosavi A., Mohammadzadeh S.D., Shams Shirband S. Comparative analysis of machine learning models for prediction of remaining service life of flexible pavement // Mathematics. 2019. Vol. 7. Issue 12. P. 1198. DOI: 10.3390/math7121198
25. Elshamy M.M.M., Tiraturyan A.N., Uglova E.V. Evaluation of the elastic modulus of pavement layers using different types of neural networks models // Advanced Engineering Research. 2022. Vol. 21. Issue 4. Pp. 364–375. DOI: 10.23947/2687-1653-2021-21-4-364-375
26. Elshamy M.M.M., Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Zakari M. Development of the non-destructive monitoring methods of the pavement conditions via artificial neural networks // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1614. Issue 1. P. 012099. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012099
27. Elshamy M.M.M., Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Elgendy M.Z. Evaluation of pavement condition deterioration using artificial intelligence models // Advanced Engineering Research. 2022. Vol. 22. Issue 3. Pp. 272–284. DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-3-272-284
28. Elshamy M.M.M., Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Elgendy M.Z. Comparison of feed-forward, cascade-forward, and Elman algorithms models for determination of the elastic modulus of pavement layers // 2021 4th International Conference on Geoinformatics and Data Analysis. 2021. Pp. 46–53. DOI: 10.1145/3465222.3465235

29. Wang H. Life cycle assessment of asphalt pavement maintenance. Rutgers University. Center for Advanced Infrastructure and Transportation, 2014.

30. Ushakov I. Reliability: past, present, future // Reliability: Theory & Applications. 2006. Vol. 1. No. 1 (1). Pp. 10–16.

Поступила в редакцию 27 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 1 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 8 ноября 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Артем Николаевич Тиратуриян** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильных дорог; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; РИНЦ ID: 803524, Scopus: 57190178833, ResearcherID: Q-2390-2017, ORCID: 0000-0001-5912-1235; tiraturjan@list.ru.

REFERENCES

1. Leonovich I.I., Novgorodsky Ya.Ya., Buryl Yu.V. Transport and operational status of the network of republican highways and the main directions for improving their quality. *Bulletin of the Belarusian National Technical University*. 2008; 6:56-63. EDN VVALSN. (rus.).

2. Krasikov O.A. *Optimal values. Automobile Roads*. 2021; 9(1078):134-137. EDN ZZMBRJ. (rus.).

3. Kirillov A.M., Zavyalov M.A. Prediction of remaining service life of asphalt-concrete pavements. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(3):356-367. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.3.356-367. (rus.).

4. Elhadidy A.A., El-Badawy S.M., Elbeltaqi E.E. A simplified pavement condition index regression model for pavement evaluation. *International Journal of Pavement Engineering*. 2021; 22(5):643-652. DOI: 10.1080/10298436.2019.1633579

5. Fakhri M., Dezfoulan R.S. Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model. *Construction and Building Materials*. 2019; 204:768-780. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.142

6. Vasiliev A.P. Target indicators for evaluating the effectiveness of modernization, repair and maintenance of highways. *Science and Technology in the Road Industry*. 2005; 1:5-8. EDN OIJYPF. (rus.).

7. Vasil'ev A.P., Efimenko V.N. Roadway reconstruction, modernization, and replacement in sub-sovereign entities. *Journal of Construction and Architecture*. 2014; 6(47):157-167. EDN TBZNID. (rus.).

8. Uglova E.V., Saenko S.S. Review of tools for the road structure state management. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2016; 3(1):6-18. EDN WKTSFF. (rus.).

9. Tiraturyan A.N., Belousov Y.S., Shatalov V.Y. Simulation of the design activity diversification of innovative enterprise. *Engineering Bulletin of the Don*. 2016; 3(42):65. EDN YGSTBV. (rus.).

10. Jiang X., Gabrielson J., Huang B., Bai Y., Polaczyk P., Zhang M. et al. Evaluation of inverted

pavement by structural condition indicators from falling weight deflectometer. *Construction and Building Materials*. 2022; 319:125991. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125991

11. Rabbi M.F., Mishra D. Using FWD deflection basin parameters for network-level assessment of flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*. 2021; 22(2):147-161. DOI: 10.1080/10298436.2019.1580366

12. Jing C., Zhang J., Song B. An innovative evaluation method for performance of in-service asphalt pavement with semi-rigid base. *Construction and Building Materials*. 2020; 235:117376. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117376

13. Vyas V., Singh A.P., Srivastava A. Entropy-based fuzzy SWOT decision-making for condition assessment of airfield pavements. *International Journal of Pavement Engineering*. 2021; 22(10):1226-1237. DOI: 10.1080/10298436.2019.1671590

14. Bosurgi G., Pellegrino O., Sollazzo G. Pavement condition information modelling in an I-BIM environment. *International Journal of Pavement Engineering*. 2022; 23(13):4803-4818. DOI: 10.1080/10298436.2021.1978442

15. Vyas V., Singh A.P., Srivastava A. Prediction of asphalt pavement condition using FWD deflection basin parameters and artificial neural networks. *Road Materials and Pavement Design*. 2021; 22(12):2748-2766. DOI: 10.1080/14680629.2020.1797855

16. Wang J., Chen M., Gao W., Guo Z., Liu Y. A comparison of network level pavement condition assessment in road asset management. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*. 2020; 6(3):95. DOI: 10.11648/j.ijtet.20200603.14

17. Kumar R., Suman S.K. Development of overall pavement condition index for maintenance strategy selection for Indian highways. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2022; 13(2):832-843. DOI: 10.1007/s13198-021-01344-z

18. Issa A., Sammaneh H., Abaza K. Modeling pavement condition index using cascade architecture: classical and neural network methods. *Ira-*

nian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2022; 46(1):483-495. DOI: 10.1007/s40996-021-00678-9

19. Han C., Fang M., Ma T., Cao H., Peng H. An intelligent decision-making framework for asphalt pavement maintenance using the clustering-PageRank algorithm. *Engineering Optimization*. 2020; 52(11):1829-1847. DOI: 10.1080/0305215X.2019.1677636

20. Ndume V., Mlavi E., Mwaipungu R. Development of Road Pavement Condition Index Using Combined Parameters. *Civil Engineering Research*. 2020; 10(3):53-62. DOI: 10.5923/j.jce.20201003.01

21. Kravcovas I., Vaitkus A., Kleizienė R. Comparison of pavement performance models for urban road management system. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2020; 15(3):111-129. DOI: 10.7250/bjrbe.2020-15.487

22. Mubarak M., Sallam H. The most effective index for pavement management of urban major roads at a network level. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2021; 46(5):4615-4626. DOI: 10.1007/s13369-020-05122-0

23. Titi H., Qamhia I.I., Ramirez J., Tabatabai H. Long-Term Performance of Flexible Pavements Constructed on Recycled Base Layers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2022; 2676(11):206-222. DOI: 10.1177/03611981221092000

24. Nabipour N., Karballaezadeh N., Dineva A., Mosavi A., Mohammadzadeh S.D., Shamshirband S. Comparative analysis of machine learning models for

prediction of remaining service life of flexible pavement. *Mathematics*. 2019; 7(12):1198. DOI: 10.3390/math7121198

25. Elshamy M.M.M., Tiraturyan A.N., Uglova E.V. Evaluation of the elastic modulus of pavement layers using different types of neural networks models. *Advanced Engineering Research*. 2022; 21(4):364-375. DOI: 10.23947/2687-1653-2021-21-4-364-375

26. Elshamy M.M.M., Tiraturyan A.N., Uglova E.V., 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. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012099

27. Elshamy M.M.M., Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Elgendy M.Z. Evaluation of Pavement Condition Deterioration Using Artificial Intelligence Models. *Advanced Engineering Research*. 2022; 22(3):272-284. DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-3-272-284

28. Elshamy M.M.M., Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Elgendy M.Z. Comparison of feed-forward, cascade-forward, and Elman algorithms models for determination of the elastic modulus of pavement layers. *2021 4th International Conference on Geoinformatics and Data Analysis*. 2021; 46-53. DOI: 10.1145/3465222.3465235

29. Wang H. *Life Cycle Assessment of Asphalt Pavement Maintenance*. Rutgers University. Center for Advanced Infrastructure and Transportation, 2014.

30. Ushakov I. Reliability: past, present, future. *Reliability: Theory & Applications*. 2006; 1(1):10-16.

Received June 27, 2023.

Adopted in revised form on November 1, 2023.

Approved for publication on November 8, 2023.

B I O N O T E S : **Artem N. Tiraturyan** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automobile Roads; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin square, 344000, Rostov-on-Don, Russian Federation; ID RSCI: 803524, Scopus: 57190178833, ResearcherID: Q-2390-2017, ORCID: 0000-0001-5912-1235; tiraturjan@list.ru.