

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

УДК [UDC] 625.7/.8

DOI 10.17816/transsyst20239446-58

© Н.А. Ермошин, Д.Ю. Кириллова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Россия)

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДОРОЖНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Цель: предлагается метод исследования долговечности дорожных сооружений в целях обеспечения надежности и безаварийной эксплуатации автомобильных дорог.

Материалы и методы: Задача оценки долговечности решается методами теории марковских случайных процессов.

Результаты: Результатом работы является математическая постановка задачи прогнозирования остаточного ресурса (долговечности) и способ ее решения.

Заключение: Метод позволяет обосновать варианты дорожно-мостовых конструкций, обладающих требуемой долговечностью при минимизации расхода ресурсов.

Ключевые слова: дорожные сооружения, автомобильная дорога, мост, долговечность, остаточный ресурс, надежность, содержание, эксплуатация.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© N.A. Ermoshin, D.Yu. Kirillova

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

METHOD OF FORECASTING THE DURABILITY OF ROAD STRUCTURES

Aim: This article is proposed method for studying the durability of road structures in order to ensure reliability and accident-free operation of highways.

Materials and Methods: The problem of durability assessment is solved by methods of the theory of Markov random processes.

Results: The result of the work is a mathematical formulation of the problem of predicting the residual resource (durability) and a method for solving it.

Conclusion: The method makes it possible to justify options for road and bridge structures that have the required durability while minimizing resource consumption.

Key words: road structures, highway, bridge, durability, residual life, reliability, maintenance, operation.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие дорожной инфраструктуры, а также сохранение, поддержание и повышение технического уровня и эксплуатационного состояния существующей дорожной инфраструктуры является важной задачей. Для успешной реализации, сбалансированных по времени и выделяемым ресурсам перспективных программ содержания и развития дорожной инфраструктуры необходимо учитывать опыт разработки проектных решений по строительству и эксплуатации автомобильных дорог и искусственных сооружений [1–4]. Практика показывает, что зачастую межремонтные сроки службы дорожных и мостовых конструкций оказываются ниже проектных или нормативных [3–8]. В результате работа автомобильных дорог становится небезопасной, а преждевременное разрушение конструктивных элементов дорожных конструкций и сооружений является причиной дорожно-транспортных происшествий, аварий и катастроф [9–14]. По данным «НЦ БДД МВД России» ежегодно более 30 % ДТП связано с недостатками эксплуатационного состояния и обустройства улиц и дорог [15–17]. Подобные ситуации могут происходить из-за ошибок при проектировании, несоблюдения технологий выполнения работ по строительству, содержанию и ремонту, а также превышения расчетных параметров состава и интенсивности дорожного движения. Это приводит к преждевременному отказу дорожных и мостовых конструкций, что влечет причинение вреда жизни, здоровью и имуществу участников дорожного движения, окружающей среде, вызывает значительные экономические ущербы.

Вопросы повышения надежности и долговечности дорожных сооружений являются актуальными. Исследованию процессов снижения надежности работы автомобильных дорог и дорожных конструкций посвящены работы И.А. Золотаря, В.Д. Казарновского, В.К. Апестина, А.И. Васильева, Е.В. Угловой и др. [2–14, 18–22].

Для исключения или смягчения последствий отказов в работе автомобильных дорог необходимо своевременно выполнять мероприятия по поддержанию их параметров на уровне, обеспечивающем безопасную эксплуатацию. В связи с этим весьма важно иметь возможность расчета остаточного срока безопасной эксплуатации дорожных и мостовых конструкций с учетом расхода ресурсов (выделяемых средств) на поддержание их в работоспособном состоянии. Другими словами, необходим способ расчета остаточного ресурса дорожных и мостовых конструкций при ограничениях на выделяемые средства на их содержание и ремонты.

МЕТОДЫ

Рассмотрим математическую постановку задачи по определению остаточного срока службы (долговечности) дорожных и мостовых конструкций. При этом под их долговечностью будем понимать *свойство, позволяющее сохранять требуемые транспортно-эксплуатационные показатели автомобильной дороги при заданных условиях эксплуатации, содержания и ремонта в течение определенного времени.*

Пусть имеется дорожная или мостовая конструкция, представляющая собой инженерное сооружение, которое характеризуется совокупностью параметров R_n , $n = 1, \dots, k$, где k - количество параметров. Каждый из этих параметров имеет требуемое номинальное значение R_n^0 . Изменение этих параметров во времени характеризует состояние дорожной или мостовой конструкции. В период работы автомобильной дороги происходит снижение значений параметров дорожных или мостовых конструкций в результате физического износа конструктивных элементов. То есть, в определенный момент времени t_i , $i=1, \dots, m$, значения параметров конструкций не увеличиваются, а остаются на прежнем уровне или уменьшаются $R_n(t_1) > R_n(t_2), \dots, > R_n(t_m)$, при условии, что $t_1 < t_2, \dots, < t_m$. Конструкция является работоспособной если значения параметров, обеспечивающих ее работоспособность принадлежат области допустимых значений Q_n , границы которой определяется минимальным $R_{n,min}$ и максимальным $R_{n,max}$ значениями $Q_n = R_{n,min} < R_n^0 < R_{n,max}$. Допускается, что выход значения параметра за пределы допустимой области приводит к параметрическому отказу конструкции. Однако параметрический отказ не влечет за собой утрату функций всей дорожной или мостовой конструкции. В действительности такой отказ лишь снижает ее работоспособность. Вероятность внезапного отказа в работе сразу всей конструкции достаточно мала. Вместе с тем дорожным и мостовым конструкциям свойственны параметрические отказы. Их последствия устраняются в процессе содержания и ремонтов дорожных сооружений. Исходя из этого автомобильная дорога и дорожные сооружения относятся к восстанавливаемым техническим системам с множеством возможных состояний $S_n(t) = \{s_0(t), s_1(t), \dots, s_{m-1}(t), s_m(t)\}$.

Дорожная конструкция может находиться в состоянии $s_0(t)$, при котором ни один из параметров не вышел за границы (не отказал) области допустимых значений; $s_1(t)$ - вышел за границы (отказал) один параметр; $s_m(t)$ - вышли за границы (отказали) все параметры. Поскольку дорожная или мостовая конструкция имеют определенный характер износа или последовательность деградации предполагается, что процесс смены ее состояний происходит упорядоченно: $s_0(t), s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t)$. Соответственно переход конструкции из одного в другое состояние

является случайным событием. Известна или может быть спрогнозирована интенсивность λ_n выхода за границы допустимой области изменения параметра R_n . Предполагается, что эта интенсивность одинакова для всех параметров, характеризующих работоспособность конструкции. Такие же допущения приняты в отношении интенсивности восстановления параметров μ_n . Допускается, что поток отказов параметров является простейшим, а функции плотности отказа и восстановления параметров являются показательными с параметрами λ и μ .

Суммарные затраты ресурсов на поддержание дорожной или мостовой конструкции в момент времени t в состоянии $S_n(t)$ будут равны $Z_n(t)$, $n = \overline{0, \dots, m}$. Известен средний расход ресурсов (норматив) на восстановление каждого параметра $\Delta Z_{n, \text{восст}}$ и на поддержание в период эксплуатации $\Delta Z_{\text{экспл}}$.

Требуется определить долговечность дорожной или мостовой конструкции с учетом ограничений на выделяемые ресурсы на поддержание их в работоспособном состоянии.

Решение сформулированной задачи предусматривает выполнение следующих действий.

1. Расчет расхода материальных ресурсов на поддержание конструкции в любом возможном состоянии $s_n(t)$, $n = \overline{0, \dots, m}$.

Для этого вначале рассматривается состояние конструкции $s_0(t)$, при котором она в момент времени $t + \Delta t$, при котором она будет работать безотказно по всем определяющим параметрам. В соответствии с основными теоремами теории вероятностей такое состояние конструкции характеризуется суммой двух несовместных событий θ_0 и θ_1 .

Событие θ_0 соответствует состоянию конструкции $s_0(t)$, при котором за время Δt все ее параметры находились в области допустимых значений. Вероятность такого события может быть рассчитана по формуле:

$$P(\theta_0) = e^{-\lambda \Delta t} \approx 1 - \lambda \Delta t.$$

Тогда расход ресурсов для этого состояния конструкции с вероятностью $P(\theta_0)$ можно определить по зависимости:

$$Z(\theta_0) = (Z_0(t) + \Delta Z_{\text{экспл}} \Delta t)(1 - \lambda \Delta t) \quad (1)$$

В свою очередь событие θ_1 соответствует состоянию конструкции $s_1(t)$, при котором за время Δt было восстановлено значение одного нарушенного параметра. Такое состояние конструкции может быть определено вероятностью $P(\theta_1) = 1 - e^{-\mu \Delta t} \approx \mu \Delta t$. В этом случае расход ресурсов с вероятностью $P(\theta_1)$ составит:

$$Z(\theta_1) = Z_1(t) \mu \Delta t \quad (2)$$

Исходя из приведенных суждений, состояние конструкции $s_0(t)$ предполагается интерпретировать как сумму несовместных событий θ_0 и θ_1 . Тогда уравнение для случайной функции расхода материальных средств будет иметь следующий вид

$$Z_0(t + \Delta t) = Z(\theta_0) + Z(\theta_1) = (Z_0(t) + \Delta Z_{\text{экспл.}} \Delta t)(1 - \lambda \Delta t) + Z_1(t) \mu \Delta t \quad (3)$$

Это уравнение можно преобразовать к следующему виду

$$Z_0(t + \Delta t) - Z_0(t) = -\lambda \Delta t Z_0(t) + \mu \Delta t Z_1(t) + \Delta Z_{\text{экспл.}} \Delta t - \lambda \Delta t^2 \Delta Z_{\text{экспл.}} \quad (4)$$

В результате деления всех частей этого равенства на Δt и определения предела получившегося выражения при $\Delta t \rightarrow 0$ получается дифференциальное уравнение

$$\frac{dZ_0(t)}{dt} = -\lambda Z_0(t) + \mu Z_1(t) + \Delta Z_{\text{экспл.}} \quad (5)$$

Далее составляются аналогичные уравнения расхода материальных ресурсов на поддержание конструкции в состоянии $s_n(t)$, $n = \overline{0, \dots, m}$. Следует заметить, что состояние конструкции $s_n(t)$ состоит в отказе n параметров к текущему моменту времени ее работы $t + \Delta t$. Подобное состояние в терминах теории вероятностей можно описать как сумму трех несовместных событий $\theta_n, \theta_{n+1}, \theta_{n-1}$.

Событие θ_n соответствует такому состоянию конструкции $s_n(t)$, при котором за время Δt не отказал и не восстановился ни один параметр. Чтобы определить вероятность такого события можно воспользоваться следующей зависимостью

$$P(\theta_n) = e^{-\lambda \Delta t} e^{-\mu \Delta t} \approx 1 - (\lambda + \mu) \Delta t \quad (6)$$

Для поддержания конструкции в таком состоянии расход материальных ресурсов с вероятностью $P(\theta_n)$ может быть рассчитан по формуле

$$Z(\theta_n) = (Z_n(t) + \Delta Z_{\text{экспл.}} \Delta t)(1 - (\lambda + \mu) \Delta t) \quad (7)$$

Событие θ_{n+1} характеризует состояние конструкции $s_{n+1}(t)$ в момент времени t , при котором за время Δt был восстановлен один ее параметр. Определение вероятности этого события осуществляется по формуле

$$P(\theta_{n+1}) = 1 - e^{-\mu \Delta t} \approx \mu \Delta t \quad (8)$$

а расход материальных ресурсов с вероятностью $P(\theta_{n+1})$ по формуле

$$Z(\theta_{n+1}) = Z_{n+1}(t) \mu \Delta t \quad (9)$$

Событие θ_{n+1} определяется тем, что в момент времени t за время Δt отказал еще один параметр конструкции. Для расчета вероятности этого события воспользуемся выражением

$$P(\theta_{n-1}) = 1 - e^{-\lambda\Delta t} \approx \lambda\Delta t \quad (10)$$

При этом расход материальных ресурсов с вероятностью $P(\theta_{n-1})$ можно определить из выражения

$$Z(\theta_{n-1}) = Z_{n-1}(t)\lambda\Delta t \quad (11)$$

Расход материальных ресурсов на поддержание конструкции в состоянии $s_n(t)$, которое характеризуется суммой рассмотренных несовместных событий $\theta_n, \theta_{n+1}, \theta_{n-1}$ определяется из уравнения для случайной функции

$$\begin{aligned} Z_n(t + \Delta t) &= Z(\theta_n) + Z(\theta_{n+1}) + Z(\theta_{n-1}) = \\ &= (Z_n(t) + \Delta Z_{\text{экспл.}} \Delta t)(1 - (\lambda + \mu)\Delta t) + Z_{n+1}(t)\mu\Delta t + Z_{n-1}(t)\lambda\Delta t \end{aligned} \quad (12)$$

После деления всех частей этого равенства на Δt и определения предела получившегося выражения при $\Delta t \rightarrow 0$ получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dZ_n(t)}{dt} = \lambda Z_{n-1}(t) - (\lambda + \mu)Z_n(t) + \mu Z_{n+1}(t) + \Delta Z_{\text{экспл.}} + \lambda \Delta Z_{\text{восст.}} \quad (13)$$

На следующем этапе составляется уравнение состояние конструкции $s_m(t)$, при котором к $t + \Delta t$ отказали все определяющие ее работоспособность параметры. Оно определяется суммой несовместных событий θ_m, θ_{m-1} .

Событие θ_m означает то, что конструкция будет в состоянии $s_m(t)$ и за время Δt не было отказа ни по одному определяющему параметру. Тогда вероятность события θ_m может быть рассчитана по формуле

$$P(\theta_m) = e^{-\mu\Delta t} \approx 1 - \mu\Delta t$$

Следовательно, расход материальных ресурсов на поддержание конструкции в этом состоянии с вероятностью $P(\theta_m)$ может быть выражен зависимостью

$$Z(\theta_m) = (Z_m(t) + \Delta Z_{\text{экспл.}} \Delta t)(1 - \mu\Delta t) \quad (14)$$

Событие θ_{m-1} соответствует состояние конструкции $s_{m-1}(t)$, при котором за время Δt за пределы области допустимых значений $Q_n = R_{n,\min} < R_n^0 < R_{n,\max}$ вышел еще один параметр. Событие θ_{m-1} произойдет с вероятностью $P(\theta_{m-1}) = 1 - e^{-\lambda\Delta t} \approx \lambda\Delta t$.

Расход материальных ресурсов для поддержания конструкции в состоянии $s_{m-1}(t)$ определяется следующим образом:

$$Z(\theta_{m-1}) = Z_{m-1}(t)\lambda\Delta t \quad (15)$$

$$X(p) = \begin{bmatrix} \theta_0(p) \\ \theta_1(p) \\ \theta_2(p) \\ \theta_3(p) \\ \dots \\ \theta_{m-1}(p) \\ \theta_m(p) \end{bmatrix}, \quad B^{(z)}(p) = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta Z_{\text{экспл.}}}{p} \\ -\frac{\Delta Z_{\text{экспл.}} + \lambda \Delta Z_{\text{восст.}}}{p} \\ \dots \\ -\frac{\Delta Z_{\text{экспл.}} + \lambda \Delta Z_{\text{восст.}}}{p} \end{bmatrix}$$

p – комплексная переменная в области существования функций $Z_n(t)$.

В соответствии с [10] найдем оценку $X(p)$ вектора $X(p)$. Для этого используем процедуру оценки матричных коэффициентов многофакторной модели регрессионного анализа.

Упрощая систему (18) за счет исключения переменной p запишем ее в виде

$$\sum_{n=1}^{m+1} A_n X_n = B^{(z)} \quad (20)$$

где A_n – блоки матрицы $A = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n \cdot \dots \cdot A_{m+1}$;

X_n – блоки транспортированной матрицы $X = X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n \cdot \dots \cdot X_{m+1}$.

Сформируем выражения для блоков матриц A и X

$$A_1 = \begin{bmatrix} -(p + \lambda) \\ \lambda \\ O_{m-1} \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} \mu \\ -(p + \lambda + \mu) \\ \lambda \\ O_{m-2} \end{bmatrix}, \quad A_n = \begin{bmatrix} O_{n-2} \\ \mu \\ -(p + \lambda + \mu) \\ \lambda \\ O_{m-n} \end{bmatrix}, \dots,$$

$$A_{m+1} = \begin{bmatrix} O_{m-1} \\ \mu \\ -(p + \mu) \end{bmatrix},$$

где O_a – нулевой вектор размерности a .

Тогда неизвестные в системе уравнений (18) могут быть получены из рекуррентного соотношения

$$\dot{X}_n = \dot{Z}_{n-1} = M_n A_n \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^{m+1} \varphi_j B^{(z)} \quad (21)$$

где $M_n = (A_n^T \prod_{j=1}^{n-1} \varphi_j A_n)^{-1}$, $\varphi_j = E - A_j M_j A_j^T \prod_{i=1}^{j-1} \varphi_i$

Выполнив обратное преобразование Лапласа для оценок (21), можно найти оригинальные случайные функции расхода материальных средств $Z_n(t)$ на обеспечение пребывания дорожной или мостовой конструкции в состоянии $s_n(t)$. При этом в момент времени t может выйти за область допустимых значений n параметров конструкции ($n = \overline{0, \dots, m}$).

Средний расход материальных средств $\bar{Z}(t)$ можно определить как математическое ожидание значений случайных функций $Z_n(t)$

$$\bar{Z}(t) = \sum_{n=0}^m Z_n(t)P_n(t) \quad (22)$$

где $P_n(t)$ означает вероятность пребывания конструкции в состоянии $s_n(t)$. По формуле (22) определяется средний расход материальных средств на поддержание конструкции в любом из ее возможных состояний. В случае близости среднего расхода материальных средств $\bar{Z}(t)$ к моменту времени $t = \hat{t}$ к дополнительному объему материальных средств Z_0 , выделяемых на эксплуатацию дорожной или мостовой конструкции можно спрогнозировать остаточный ресурс (долговечность) конструкции

$$\hat{t} = \operatorname{argmin}_t e(Z_0 - \bar{Z}(t)); t \in T$$

где T – множество всех возможных значений для t .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим применение методики прогнозирования долговечности дорожных сооружений для оценки остаточного ресурса дорожной конструкции. По данным статистических наблюдений известно параметры отказа дорожной конструкции характеризуются интенсивностью $\lambda = 5^{-1}$, а восстановления $\mu = 14^{-1}$. Число параметров, характеризующих работу конструкции $m = 1$.

Эксплуатационные расходы на содержание конструкции составляют $\Delta Z_{\text{экспл}} = 1000$ ед. Средний расход на восстановление отказавшего параметра $\Delta Z_{n,\text{восст}} = 5000$ ед. Требуется определить остаточный ресурс конструкции если для ее содержания выделено $Z_0 = 50000$ ед.

В результате расчета значение остаточного ресурса конструкции составляет 3 года 21 день.

Таким образом, предложенная методика может применяться при планировании работ по эксплуатации автомобильных дорог.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения безопасности на автомобильных дорогах, необходимо своевременно выполнять мероприятия по поддержанию состояния дорожной конструкции в соответствии с заданными условиями эксплуатации. Однако, в условиях ограниченного финансирования выдерживать нормативные требования к транспортно-эксплуатационному состоянию автомобильных дорог и дорожных конструкций не представляется возможным [5].

Предложенный в данной работе метод прогнозирования долговечности дорожных сооружений позволяет рассчитать долговечность дорожной или мостовой конструкции с учетом ограничений на выделяемые ресурсы на их содержание и ремонты. Таким образом, можно планировать сбалансированные по времени и выделяемым ресурсам мероприятия по содержанию и эксплуатации дорожных сооружений.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Алексеев С.В., Симонов Д.Л., Катикова А.С. Воздействие природных факторов на состояние дорог в различных регионах России // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 14–30. [Alekseev SV, Simonov DL, Katikova AS. The impact of natural factors on the condition of roads in various regions of Russia. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):14-30. (Russ., Engl.)] doi: 10.17816/transsyst20228414-30
2. Тиратурян А. Н. Симакова А.А., Бодров И.В. и др. Оценка надежности дорожной одежды на стадии эксплуатации // Инженерный вестник Дона. – 2017. – Т. 47. – №. 4. – С. 196. [Tiraturyan AN, Simakova AA, Bodrov IV, et al. Evaluation of the reliability of pavement during the operation phase. *Engineering Journal of Don*. 2017;47(4):196. (Russ., Engl.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32731338>
3. Тиратурян, А. Н. Новый подход к мониторингу состояния нежестких дорожных одежд // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2019. – № 2(54). – С. 121–133. [Tiraturyan AN. New approach to technical monitoring of the condition of flexible roadway pavements. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2019;2(54):121-133. (Russ., Engl.)] doi: 10.25987/VSTU.2019.54.2.011
4. Дараган К.А., Коновалов К.В. Проблемы качества, надежности и долговечности мостов на автомобильных дорогах // Электронный сетевой политематический журнал «научные труды КубГТУ». – 2020. – №8. – С. 687–701. [Daragan KA, Konovalov KV. Problems of quality, reliability and durability of bridges on roads. *Scientific works of KubSTU*. 2020;8:687-701. (Russ., Engl.)] Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45768957> Ссылка активна на: 01.11.2023.
5. Апестин В. К. О расхождении проектных и нормативных межремонтных сроков службы дорожных одежд // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 1. – С. 18–20. [Apestin VK. About divergence between design and normative interrepair periods of road pavement service. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2011;1:18-20. (Russ., Engl.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://lib.madi.ru/nitdo/index.html>
6. Белый А. А. Основные положения методики прогнозирования сроков службы эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений // Наука и бизнес: пути развития. – 2016. – № 10(64). – С. 9–20. [Bely AA. Main provisions of the

- forecasting method of the service life of reinforced concrete bridges. *Science and Business: Ways of Development*. 2016;10(64):9-20. (Russ., Engl.). Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27328105>
7. Гуга Н.А., Аверченко Г.А., Васильев К.А. и др. Планирование затрат и пути совершенствования службы эксплуатации мостов // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2021. – № 2 (7). – С. 30–41. [Guga NA, Averchenko GA, Vasiliev KA, et al. Cost planning and ways to improve bridge maintenance. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(2):30-41. (Russ., Engl.)] doi: 10.17816/transsyst20217230-41
 8. Кулижников А.М. Пути увеличения межремонтных сроков службы автомобильных дорог // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2018. – № 2 (75). – С. 46–50. [Kulizhnikov AM. Methods for increasing the motorway repair-to-repair time. *Transport Rossiiskoi Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike*. 2018;2(75):46-50. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/puti-uvelicheniya-mezhremontnyh-srokov-sluzhby-avtomobilnyh-dorog>
 9. Муравьева Н.А. Анализ состояния вопросов обеспечения безопасности движения с учетом дорожных условий // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2017. – № 1(21). – С. 62–67. [Muravyova NA. The analysis of the condition of questions of safety of the movement taking into account road conditions. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*. 2017;1(21):62-67 (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30522609>
 10. Ермошин, Н.А. Моделирование и оценка риска разрушения дорожной одежды на автомобильных дорогах / Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 11–13 ноября 2019 года; Воронеж: Воронежский государственный университет, Научно-исследовательские публикации, 2020. – С. 1365-1371. [Ermoshin NA. Modelirovanie i ocenka riska razrusheniya dorozhnoj odezhdy` na avtomobil`ny`x dorogax In: Proceedings of the International Scientific Conference “Aktual'nye problemy prikladnoi matematiki, informatiki i mekhaniki”. 2019 November 11-13; Voronezh. Nauchno-issledovatel`skie publikacii; 2020. pp. 1365-1371. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42493583>
 11. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г. и др. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 // Транспортные сооружения. – 2017. – Т. 4. – № 4. – С. 11. [Maystrenko IY, Ovchinnikov II, Ovchinnikov IG, et al. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 1. *Russian journal of transport engineering*. 2017;4(4):11. (Russ., Engl.)] doi: 10.15862/13TS417
 12. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Майстренко И.Ю. и др. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 2 // Транспортные сооружения. – 2017. – Т. 4. – № 4. – С. 12. [Ovchinnikov IG, Ovchinnikov II, Maystrenko IY, et al. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 2. *Russian journal of transport engineering*. 2017;4(4):11. (Russ., Engl.)] doi: 10.15862/14TS417
 13. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г. и др. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 3 // Транспортные сооружения. – 2018. – Т. 5. – № 1. – С. 8. [Maystrenko IY, Ovchinnikov II, Ovchinnikov IG, et al. Failures and collapses of bridge

- constructions, analysis of their causes. Part 3. *Russian journal of transport engineering*.2018;5(1):8. (Russ., Engl.). doi: 10.15862/08SATS118
14. Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Овчинников И.Г. и др. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 4 // Транспортные сооружения. –2018. – Т. 5. – № 1. – С. 5. [Ovchinnikov II, Maystrenko IY, Ovchinnikov IG, et al. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 4. *Russian journal of transport engineering*.2018;5(1):5. (Russ., Engl.). doi: 10.15862/05SATS118
 15. Баканов К.С., Ляхов П.В., Наумов С.Б. и др. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 2020 год. Информационно-аналитический обзор / под ред. Д.В. Митрошина, С.А. Рыжова. – М.: ФКУ «НЦ БДД МВД России», 2021. – 79 с. [Bakanov KS, Lyahov PV, Naumov SB, et al. *Dorozhno-transportnaya avariinost' v Rossiiskoi Federatsii za 2020 god. Informatsionno-analiticheskii obzor*. Mitroshin DV, Ryzhov SA, editors. Moscow: Scientific State Institution of Road Safety of the Ministry of the Interior of the Russian Federation; 2021, 79 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://media.mvd.ru/files/embed/2174641>
 16. Баканов К.С., Ляхов П.В., Лопарев Е.А. и др. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 2021 год. Информационно-аналитический обзор / под ред. Д.В. Митрошина, С.А. Рыжова. – М.: НЦ БДД МВД России, 2022. – 126 с. [Bakanov KS, Lyahov PV, Loparev EA, et al. *Dorozhno-transportnaya avariinost' v Rossiiskoi Federatsii za 2021 god. Informatsionno-analiticheskii obzor*. Mitroshin DV, Ryzhov SA, editors. Moscow: Scientific State Institution of Road Safety of the Ministry of the Interior of the Russian Federation; 2022, 126 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://media.mvd.ru/files/embed/3935922>
 17. Баканов К.С., Ляхов П.В., Айсанов А.С. и др. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 2022 год. Информационно-аналитический обзор / под ред. Д.В. Митрошина, С.А. Рыжова. – М.: НЦ БДД МВД России, 2023. – 150 с. [Bakanov KS, Lyahov PV, Ajsanov AS, et al. *Dorozhno-transportnaya avariinost' v Rossiiskoi Federatsii za 2022 god. Informatsionno-analiticheskii obzor*. Mitroshin DV, Ryzhov SA, editors. Moscow: Scientific State Institution of Road Safety of the Ministry of the Interior of the Russian Federation; 2023, 150 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://media.mvd.ru/files/embed/4761994>
 18. Казарновский В.Д. Расчетный срок службы и уровень надежности при расчете дорожных одежд на прочность // Транспортное строительство. – 2007. – № 1. – С. 72–73. [Kazarnovskij VD. *Raschetnyi srok sluzhby i uroven' nadezhnosti pri raschete dorozhnykh odezhd na prochnost'*. *Transport construction*. 2007;1:72–73. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://rostransport.com/transportrf/pdf/7-8/72-73.pdf>
 19. Углова Е.В. Прогнозирование остаточного ресурса асфальтобетонных покрытий с учетом реальных условий эксплуатации // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2010. – № 17 (36). – С. 43–47. [Uglova EV. *Forecasting of the residual resource asphalt concrete coverings with the account real working conditions*. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series "Construction and Architecture"*. 2010;17(36):43-47. (Russ., Engl.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13088680>

20. Васильев А.И. Деградационные процессы и остаточный ресурс долговечности мостовых элементов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2020. – № 1(23). – С. 1. [Vasilyev AI. Degradation processes and residual resource durability of bridge elements. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura.* 2020;1(23):1. (Russ., Engl.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43083465>
21. Васильев А. И., Валиев Ш. Н., Шмидт В. С. и др. Длительные деградационные процессы, влияющие на снижение грузоподъемности и долговечности мостовых сооружений в период их эксплуатации // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14 – № 2. – С. 50. [Vasilyev AI, Valiev SHN, Schmidt VS, et al. Long-term degradation processes affecting the reduction of load capacity and durability of bridge structures during their maintenance. *The Eurasian Scientific Journal.* 2022;14(2):50. (Russ., Engl.)]. Ссылка активна на: 01.11.2023. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49089496>

Сведения об авторах:

Ермошин Николай Алексеевич, доктор военных наук, профессор;
eLibrary SPIN: 6694-8297; ORCID: 0000-0002-0367-5375;
E-mail: ermonata@mail.ru

Кириллова Диана Юрьевна, ассистент, Инженерно-строительный институт;
eLibrary SPIN: 2517-3033; ORCID: 0000-0003-3440-2182;
E-mail: kirdiana@mail.ru

Information about the authors:

Nikolay A. Ermoshin, Doctor of Military Sciences, Professor;
eLibrary SPIN: 6694-8297; ORCID: 0000-0002-0367-5375;
E-mail: ermonata@mail.ru

Diana Yu. Kirillova, Assistant, Civil Engineering Institute;
eLibrary SPIN: 2517-3033; ORCID: 0000-0003-3440-2182;
E-mail: kirdiana@mail.ru

Цитировать:

Ермошин Н.А., Кириллова Д.Ю. Метод прогнозирования долговечности дорожных сооружений // *Инновационные транспортные системы и технологии.* – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 46–58. doi: 10.17816/transsyst20239446-58

To cite this article:

Ermoshin NA, Kirillova DYU. Method of forecasting the durability of road structures. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2023;9(4):46-58. doi: 10.17816/transsyst20239446-58