

УДК 625.7-192:519.2

О. В. Никулич, В. С. Воробьев

Сибирский государственный университет путей сообщения

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Существующие нормативные подходы к расчету дорожных конструкций не в полной мере учитывают вероятностную природу процессов накопления деформаций с последующей деградацией и восстановления конструктивных элементов. В статье предложена методика оценки надежности дорожной конструкции как комплексированной системы, в которую входят последовательно взаимодействующие конструктивные элементы: покрытие, основание, дополнительный слой основания и земляное полотно (рабочий слой). Процесс деградации каждого элемента моделируется двухпараметрическим распределением Вейбулла, которое позволяет отразить монотонный рост интенсивности отказов вследствие накопления усталостных и климатических повреждений. Математическая модель опирается на дифференциальные уравнения Колмогорова с переменными интенсивностями отказов и постоянными интенсивностями восстановления, причем учтена технологическая иерархия: восстановление нижележащего слоя влечет переустройство всех вышележащих. Получены аналитические выражения для вероятности безотказной работы системы и приближенный метод вычисления коэффициента готовности через средние интенсивности отказов. Выполнена верификация модели на примере дорожной конструкции для участка региональной автомобильной дороги III технической категории «Новосибирск — Кочки — Павлодар» в Новосибирской области. Коэффициент готовности конструкции составил 0,9935, что превышает нормативный порог 0,98, а вероятность безотказной работы за пять лет 0,682, за двенадцать лет — 0,367. Результаты могут быть использованы для технико-экономического обоснования проектных решений, а также обоснования межремонтных сроков и планирования ремонтных мероприятий.

К л ю ч е в ы е с л о в а: дорожная конструкция, надежность, комплексированная система, распределение Вейбулла, коэффициент готовности, вероятность безотказной работы, межремонтный срок.

Введение

Обеспечение надежности и долговечности автомобильных дорог в Российской Федерации сохраняет высокую актуальность в условиях роста интенсивности движения, увеличения осевых нагрузок и обширного разнообразия региональных особенностей климатических воздействий, определенного географическим положением страны. Согласно действующей нормативной документации, надежность дорожной одежды определяется как вероятность безотказной работы дорожной конструкции в течение всего расчетного (нормативного) межремонтного срока службы¹. Однако существующие методы

¹ СП 34.13330.2021. Автомобильные дороги. СНиП 2.05.02—85* (утв. и введен в действие приказом Минстроя России от 09.02.2021 № 53/пр, ред. от 27.12.2024).

ГОСТ 27751—2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (введен в действие приказом Росстандарта от 11.12.2014 № 1974-ст, ред. от 23.12.2022).

ГОСТ Р 71404—2024. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования (утв. и введен в действие приказом Росстандарта от 05.08.2024 № 1022-ст).

ОДН 218.1.052—2002. Оценка прочности нежестких дорожных одежд (утв. распоряжением Минтранса России от 19.11.2002 № ОС-1040-р).

расчета по предельным состояниям, в свою очередь использующие вероятностные подходы, основанные на нормальном законе распределения, не в полной мере учитывают вероятностную природу процессов накопления повреждений и восстановления конструктивных слоев во времени, поскольку ограничиваются статическими квантильными оценками.

В мировой практике широкое распространение получили вероятностные подходы, включая марковские модели деградации [1—3], методы Монте-Карло для учета вариативности исходных параметров [4—6], а также вероятностные подходы, интегрированные в руководство по проектированию дорожных одежд American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)². В отечественной науке вопросам надежности дорожных конструкций посвящены работы А. Н. Тиратуряна [7, 8], Р. П. Моисеенко и В. Н. Ефименко [9, 10], Д. Ю. Кирилловой и Н. А. Ермошина [11], М. О. Аллаева [12], Н. Е. Кокодевой³ и других исследователей, в том числе вопросам повышения несущей способности региональных автомобильных дорог за счет выбора оптимальных технологий ремонта и совершенствования технологических процессов посвящены работы С. В. Алексикова [13, 14].

В настоящем исследовании дорожная конструкция представлена как комплексированная система, образованная несколькими конструктивными элементами, последовательно воспринимающими нагрузку. Отказ любого из них может привести к предельному состоянию всей конструкции, требующему проведения ремонтных мероприятий. При этом ремонт нижележащего слоя технологически невозможен без переустройства вышележащих, что формирует иерархическую зависимость времен восстановления. Большинство существующих вероятностных моделей рассматривают элементы дорожной одежды изолированно, не принимая во внимание эту взаимосвязь. Кроме того, допущение о постоянстве интенсивностей отказов, характерное для экспоненциальных моделей, не согласуется с реальным процессом накопления повреждений, при котором интенсивность отказов со временем монотонно возрастает.

Целью настоящей работы являются разработка методики оценки надежности дорожной конструкции на основе распределения Вейбулла, позволяющего описывать нарастание интенсивности отказов, с явным учетом технологической иерархии восстановления, а также ее апробация на данных с реальных объектов территориальных и региональных дорог Новосибирской области.

Материалы и методы

Конструктивная схема. Дорожная конструкция (ДК) рассматривается как комплексированная система, состоящая из четырех последовательно соединенных конструктивных элементов: покрытие (п), основание (ос), дополнительный слой основания — морозозащитный/дренирующий (дс) и земляное полотно (зп). Последовательное соединение означает, что отказ любого из четырех элементов приводит к переходу на уровень, при котором надежная

² AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington, D.C. : AASHTO, 1993. 624 p.

³ Кокодева Н. Е. Оценка качества существующих дорожных одежд нежесткого типа с учетом вариации влажности грунта земляного полотна : дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2011. 178 с.

и безопасная эксплуатация конструктивных элементов участка автомобильной дороги не может быть обеспечена, а именно к наступлению предельного состояния, требующего проведения ремонтных мероприятий (рис.).



Конструктивная схема дорожной конструкции

В исследовании принимаются следующие допущения: вероятность одновременного отказа двух и более элементов пренебрежимо мала (ординарный поток отказов); восстановление отказавшего элемента начинается в плановом порядке после обнаружения дефекта в соответствии с действующими нормативными регламентами.

Описание графа состояний и интенсивности переходов. Система может находиться в одном из пяти состояний: S_0 — все элементы работоспособны; S_1 — отказ покрытия; S_2 — отказ основания; S_3 — отказ дополнительного слоя; S_4 — отказ земляного полотна (рабочего слоя). Переход из S_0 в состояние S_i происходит с интенсивностью отказа $\lambda_i(t)$, зависящей от времени, обратный переход (восстановление) — с постоянной интенсивностью μ_i . Интенсивности восстановления приняты постоянными, так как время ремонта, как правило, ограничено технологическими особенностями производства работ, и практически не зависят от того, насколько долго конструкция находилась в неработоспособном состоянии.

Принята иерархическая зависимость восстановления, приближенная к технологии дорожно-ремонтных работ:

- в случае восстановления покрытия ($S_1 \rightarrow S_0$) требуют ремонта только слои покрытия (время $T_{в.п.}$);
- дефекты или отказ основания ($S_2 \rightarrow S_0$) влекут переустройство покрытия (суммарное время $T_{в.осн} + T_{в.п.}$);
- аналогично восстановление дополнительного слоя ($S_3 \rightarrow S_0$) требует переустройства основания и покрытия ($T_{в.дс} + T_{в.осн} + T_{в.п.}$);
- восстановление земляного полотна (рабочего слоя) ($S_4 \rightarrow S_0$) требует полного переустройства всех вышележащих слоев ($T_{в.зп} + T_{в.дс} + T_{в.осн} + T_{в.п.}$).

Интенсивности восстановления обратно пропорциональны указанным временам.

Математическая модель. Динамика состояний системы описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -(\lambda_n(t) + \lambda_{осн}(t) + \lambda_{дс}(t) + \lambda_{зп}(t))P_0 + \mu_n P_1 + \mu_{осн} P_2 + \mu_{дс} P_3 + \mu_{зп} P_4, \\ \frac{dP_i}{dt} = \lambda_i(t)P_0 - \mu_i P_i, i = 1, 2, 3, 4, \end{cases} \quad (1)$$

где индексы 1, 2, 3, 4 соответствуют элементам п, ос, дс, зп, а λ_i и μ_i — соответствующие интенсивности, с нормировочным условием $P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 1$.

Ввиду нестационарности $\lambda_i(t)$ процесс является неоднородным, и стационарное распределение в классическом смысле не существует. Однако для практических инженерных оценок используют средние интенсивности отказов на характерном временном интервале, что позволяет получить приближенное значение коэффициента готовности.

Модель деградации на основе распределения Вейбулла. Интенсивность отказов каждого элемента описывается двухпараметрическим распределением Вейбулла [15]:

$$\lambda_i(t) = \frac{\beta_i}{\eta_i} \left(\frac{t}{\eta_i} \right)^{\beta_i - 1}, \quad (2)$$

где η_i — параметр масштаба; β_i — параметр формы.

Соответствующая вероятность безотказной работы одного элемента за время t :

$$P_i(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta_i} \right)^{\beta_i} \right]. \quad (3)$$

Параметр масштаба η_i определяется из условия, что заданный нормативный межремонтный срок T_i равен математическому ожиданию времени безотказной работы:

$$\eta_i = \frac{T_i}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta_i} \right)}, \quad (4)$$

где $\Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta_i} \right)$ — гамма-функция.

При $\beta_i > 1$ интенсивность отказов монотонно возрастает, что адекватно для дорожных одежд, эксплуатирующихся в условиях накопления усталостных и климатических повреждений [2, 16].

Для асфальтобетонного покрытия параметр формы β_n принят равным 1,5. Это значение соответствует экспериментальным данным по усталостной долговечности асфальтобетонных смесей, где показано, что распределение Вейбулла хорошо описывает разброс усталостной долговечности, а параметр формы для различных типов асфальтобетона находится в диапазоне 1,2...1,8 [17, 18]. В работе [1] также отмечается, что параметр формы,

характеризующий скорость нарастания отказов асфальтобетонных покрытий, обычно составляет 1,3...1,8 в зависимости от состава смеси и условий нагружения. Следовательно, выбранное значение $\beta_{\text{п}} = 1,5$ является репрезентативным для асфальтобетонных покрытий.

Для основания, дополнительного слоя и земляного полотна параметр формы $\beta_{\text{осн}} = \beta_{\text{дс}} = \beta_{\text{зп}}$ принят равным 1,3. Исследования усталостных характеристик цементогрунтовых и щебеночных оснований показывают, что параметр формы распределения Вейбулла для этих материалов обычно лежит в диапазоне 1,1...1,4 [19, 20]. В работе [19] на основе экспериментальных данных установлено, что параметр формы варьируется от 1,0 до 1,5 в зависимости от содержания вяжущего и времени твердения. Значение $\beta = 1,3$ отражает более медленное, но устойчивое нарастание интенсивности отказов в несущих слоях по сравнению с покрытием, что согласуется с их большими межремонтными и гарантийными сроками.

Покрытие с $\beta = 1,5$ деградирует быстрее несущих слоев ($\beta = 1,3$), являясь лимитирующим фактором долговечности всей конструкции.

Вероятность безотказной работы системы. Элементы соединены последовательно в части надежности, поэтому общая вероятность безотказной работы вычисляется как произведение вероятностей элементов:

$$P_{\text{системы}}(t) = \exp \left[- \sum_{i=1}^4 \left(\frac{t}{\eta_i} \right)^{\beta_i} \right]. \quad (5)$$

Коэффициент готовности. На интервале $[0, T]$, где T — межремонтный срок покрытия (12 лет), средняя интенсивность отказов элемента составляет:

$$\bar{\lambda}_i = \frac{1}{T} \int_0^T \lambda_i(t) dt = \frac{T^{\beta_i-1}}{\eta_i^{\beta_i}}. \quad (6)$$

Приближенный коэффициент готовности вычисляется по формуле стационарного режима:

$$K_r \approx \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^4 \frac{\bar{\lambda}_i}{\mu_i}}. \quad (7)$$

Предложенная в исследовании методология позволит выявить влияние нарастающей интенсивности отказов.

Исходные данные для верификации

Численный анализ проведен для новой конструкции дорожной одежды, рассчитанной по методике ГОСТ Р 71404—2024⁴, для участка автомобильной дороги «Новосибирск — Кочки — Павлодар» со следующими параметрами:

- Западно-Сибирский регион;
- III техническая категория;

⁴ ГОСТ Р 71404—2024. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования (утв. и введен в действие приказом Росстандарта от 05.08.2024 № 1022-ст).

- капитальный тип;
- требуемый модуль упругости 333 МПа;
- дорожно-климатическая зона III, подзона 1;
- 2-я схема увлажнения рабочего слоя;
- грунт рабочего слоя — суглинок легкий пылеватый;
- расчетная влажность грунта 0,770;
- глубина промерзания 188 см.

Конструкция дорожной одежды включает следующие конструктивные слои:

- верхний слой покрытия: асфальтобетон А16ВТ, ГОСТ Р 58406.2—2020, толщиной 5 см;
- нижний слой покрытия: асфальтобетон А16НТ, ГОСТ Р 58406.2—2020, толщиной 5 см;
- верхний слой основания: асфальтобетон А16ОТ, ГОСТ Р 58406.2—2020, толщиной 7 см;
- средний слой основания: щебень фракционированный 31,5...63 мм с заклиной фракционированным мелким щебнем 4...16 мм, ГОСТ 32703—2014, толщиной 29 см;
- нижний слой основания: щебеночно-песчаная смесь 0/63, ГОСТ Р 70458—2022, толщиной 24 см;
- дополнительный слой: песок мелкий с содержанием пылевато-глинистой фракции не более 5 % и коэффициентом фильтрации не менее 2 м/сут, ГОСТ 32824—2014, толщиной 39 см;
- частичная замена грунта рабочего слоя: песок с содержанием пылевато-глинистой фракции не более 5 %, ГОСТ 33063—2014, толщиной 50 см;
- существующее земляное полотно: суглинок легкий пылеватый.

Межремонтные сроки для слоев покрытия приняты 12 лет (105 120 ч)⁵. Поскольку восстановление слоев основания и земляного полотна носит капитальный характер, межремонтные сроки приняты 24 года (210 240 ч)⁶.

Интенсивности восстановления μ_i вычислены по нормам трудозатрат, принятым на основании локального сметного расчета на строительство 1 км рассматриваемой конструкции дорожной одежды при составе бригады 8 чел.: $\mu_{\text{п}} = 1,48 \cdot 10^{-2} \text{ ч}^{-1}$, $\mu_{\text{осн}} = 5,08 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$, $\mu_{\text{дс}} = 2,59 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$, $\mu_{\text{зп}} = 1,54 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$.

Результаты

Параметры распределения Вейбулла. По формуле (4) получено:

- для покрытия:

$$\eta_{\text{п}} = 105\,120 / \Gamma(1,6667) \approx 105\,120 / 0,9027 \approx 116\,450 \text{ ч};$$

- для остальных элементов:

$$\eta_{\text{осн}} = \eta_{\text{дс}} = \eta_{\text{зп}} = 210\,240 / \Gamma(1,7692) \approx 210\,240 / 0,9221 \approx 228\,000 \text{ ч}.$$

⁵ ГОСТ Р 58861—2020. Дороги автомобильные общего пользования. Капитальный ремонт и ремонт. Планирование межремонтных сроков (утв. и введен в действие приказом Росстандарта от 26.05.2020 № 228-ст).

⁶ Там же.

Вероятность безотказной работы системы. Расчет по формуле (5) устанавливает следующие значения:

- за 150 ч (≈ 1 неделя) — 0,9998;
- за 1 год (8760 ч) — 0,900;
- за 5 лет (43 800 ч) — 0,682;
- за 12 лет (105 120 ч) — 0,367.

Высокое значение на коротком горизонте (неделя) свидетельствует о практически полном отсутствии риска внезапных отказов между плановыми осмотрами. К концу пятого года, соответствующему гарантийному сроку на покрытие автомобильной дороги⁷, около 68 % конструкций еще не потребуют ремонта, а к концу двенадцатого года их доля снижается до 36,7 %.

Коэффициент готовности. Средние интенсивности, вычисленные по формуле (6), для периода 12 лет составили:

$$\bar{\lambda}_{\text{п}} \approx 2,58 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1};$$

$$\bar{\lambda}_{\text{осн}} = \bar{\lambda}_{\text{дс}} = \bar{\lambda}_{\text{зп}} \approx 1,14 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

Подставив средние интенсивности в формулу (7), получаем коэффициент готовности расчетной дорожной конструкции:

$$K_{\text{г}} \approx \frac{1}{1 + 6,50 \cdot 10^{-3}} \approx 0,9935.$$

Полученное значение превышает нормативный порог 0,98, установленный ГОСТ Р 58137—2018 для дорожных одежд капитального типа⁸, что подтверждает высокий уровень эксплуатационной надежности рассматриваемой дорожной конструкции.

Обсуждение

Применение распределения Вейбулла с параметром формы $\beta > 1$ дает физически обоснованную картину деградации дорожной одежды: сразу после ремонта интенсивность отказов мала, а по мере накопления повреждений она нарастает, что полностью согласуется с практикой эксплуатации. Этот результат подчеркивает важность регулярного текущего ремонта покрытия, который позволяет продлить срок службы всей системы без полной замены конструкции.

Предложенная методика является простым инструментом для экспресс-оценки показателей надежности на стадии проектирования, используя нормативные межремонтные сроки, трудозатраты на восстановление и обоснованные значения параметров формы, которые могут уточняться по мере накопления региональной статистики отказов. Для более детального анализа, учитывающего календарное планирование ремонтов и сезонную вариацию нагрузок, может потребоваться переход к имитационному моделированию,

⁷ Об утверждении типовых условий контрактов на выполнение работ по ремонту автомобильных дорог, искусственных дорожных сооружений : постановление Правительства РФ от 08.04.2023 № 572.

⁸ ГОСТ Р 58137—2018. Дороги автомобильные общего пользования. Руководство по оценке риска в течение жизненного цикла (утв. и введен в действие приказом Росстандарта от 10.05.2018 № 240-ст).

однако формулы (5)—(7) обеспечивают приемлемую точность для большинства практических задач.

Заключение

Разработана методика вероятностной оценки надежности дорожной конструкции на основе распределения Вейбулла с учетом иерархической зависимости восстановления.

Апробация методики на примере новой дорожной конструкции для участка территориальной автомобильной дороги «Новосибирск — Кочки — Павлодар» в Новосибирской области показала, что коэффициент готовности составляет 0,9935, вероятность безотказной работы всей системы за 5 лет — 0,682, за 12 лет — 0,367.

Анализ индивидуальных функций надежности показал, что наиболее уязвимым элементом является покрытие автомобильной дороги, и его своевременное восстановление критически важно для обеспечения работоспособности в целом всей конструкции.

Методика может быть рекомендована к использованию в проектных организациях для технико-экономического обоснования проектных решений, а также для обоснования межремонтных сроков и планирования ремонтных мероприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Agunwamba J., Tiza M. T., Okafor F.* An appraisal of statistical and probabilistic models in highway pavements // *Turkish Journal of Engineering*. 2024. Vol. 8. Iss. 2. Pp. 300—329. DOI: 10.31127/tuje.1303964.
2. Life-cycle performance, design, maintenance, optimization, and decision-making of asphalt pavement under uncertainty / J. Xin, D. M. Frangopol, M. Akiyama, L. Zhang, J. Pei // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2026. Vol. 22. Iss. 2. Pp. 358—386.
3. *Li N., Xie W.-C., Haas R.* Reliability-based processing of Markov chains for modeling pavement network deterioration // *Transportation Research Record*. 1996. No. 1524. Pp. 203—213.
4. *Rodríguez Moreno M. A., Echaveguren Navarro T., Thenoux Zeballos G.* Including reliability in the AASHTO-93 flexible pavement design method integrating pavement deterioration models // *Revista de la Construcción*. 2017. Vol. 16. Iss. 2. Pp. 284—294. DOI: 10.7764/RDLC.16.2.284.
5. *Santos C. R., Suzuki C. Y., Bernucci L. L. B.* A probabilistic approach for asphaltic pavements design in Brazil // 8th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements (MAIREPAV8) : Research Publishing Services. Singapore, 2016. Pp. 1—12.
6. Life-cycle performance, design, maintenance, optimization, and decision-making of asphalt pavement under uncertainty: a review / J. Xin, D. M. Frangopol, M. Akiyama, L. Zhang, J. Pei // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2026. Vol. 22. No. 2. Pp. 358—386.
7. *Тиратурян А. Н.* Сценарии эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильных дорог // *Вестн. МГСУ*. 2025. Т. 20. № 3. С. 387—402.
8. *Тиратурян А. Н., Симакова А. А., Бодров И. В., Фарниева М. В.* Оценка надежности дорожной одежды на стадии эксплуатации // *Инженер. вестн. Дона*. 2017. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4509](http://vdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4509).
9. *Моисеенко Р. П., Ефименко В. Н.* К оценке долговечности автомобильных дорог // *Вестн. Томского гос. архитектур.-строит. ун-та*. 2019. Т. 21. № 3. С. 174—185.
10. *Моисеенко Р. П., Пушкарева Г. В., Куция И. З.* Надежность дорожных одежд по критерию морозоустойчивости: вероятностный анализ // *Вестн. Томского гос. архитектур.-строит. ун-та*. 2021. Т. 23. № 4. С. 112—124.
11. *Кириллова Д. Ю., Ермошин Н. А.* Вероятностный подход к проектированию дорожных одежд // *Вестн. Томского гос. архитектур.-строит. ун-та*. 2022. Т. 24. № 5. С. 143—155.
12. *Аллаев М. О.* Методы прогноза безопасной работы земляного полотна автомобильной дороги // *Вестн. Дагестан. гос. техн. ун-та. Техн. науки*. 2013. № 4(31). С. 78—84.
13. Дорожные одежды региональных дорог с основанием из асфальто-щебеночно-грунтовых смесей / С. В. Алексиков, А. И. Лескин, Д. И. Гофман, Л. М. Лескина,

И. И. Глазунов // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2024. Вып. 4(97). С. 95—103. DOI: 10.35211/18154360_2024_4_95.

14. Конструктивные особенности ремонта автомобильных дорог Волго-Ахтубинской поймы / С. В. Алексиков, А. И. Лескин, Л. М. Лескина, А. О. Евдокименко, С. Н. Сосновский // Вестн. Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер. : Стр-во и архитектура. 2024. Вып. 4(97). С. 104—113. DOI: 10.35211/18154360_2024_4_104.

15. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability // Journal of Applied Mechanics. 1951. Vol. 18. Iss. 3. Pp. 293—297.

16. Rausand M., Høyland A. System reliability theory: models, statistical methods, and applications. 2nd ed. Hoboken : Wiley, 2004. 644 p.

17. Li Xiao, Liang Naixing, Cheng Zhihao. Estimation of fatigue failure of asphalt concrete based on three-parameter Weibull distribution // Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science). 2017. Vol. 36. Iss. 1. Pp. 36—41.

18. Development of probabilistic fatigue curve for asphalt concrete based on viscoelastic continuum damage mechanics / M. E. Kutay et al. // International Journal of Pavement Research and Technology. 2016. Vol. 9. Iss. 6. Pp. 466—475. DOI: 10.1016/j.ijprt.2016.09.001.

19. Standardization of fatigue characteristics of cement-treated aggregate base materials under different stress states / Jiawei Xie et al. // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. Iss. 9. Art. no. 1500. DOI: 10.3390/app8091500.

20. Wang Chong, Wang Yong, Wang Bing. Study on fatigue property of lean concrete base // Journal of Zhengzhou University (Engineering Science). 2007. Vol. 28. Iss. 2. Pp. 15—18. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6833.2007.02.004.

© Никулич О. В., Воробьев В. С., 2026

Поступила в редакцию
01.06.2026

Ссылка для цитирования:

Никулич О. В., Воробьев В. С. Оценка надежности дорожной конструкции с использованием аналитических методов теории надежности // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 3(104). С. 81—90. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_81.

Об авторах:

Никулич Октябрина Владимировна — аспирант каф. технологий, организации и экономики строительства, Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС). Российская Федерация, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191; okti888@mail.ru

Воробьев Валерий Степанович — д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологий, организации и экономики строительства, Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС). Российская Федерация, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191; vorobjev@stu.ru

Oktyabrina V. Nikulich, Valeriy S. Vorobyev

Siberian Transport University

METHODOLOGY FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF ROAD STRUCTURE RELIABILITY USING ANALYTICAL METHODS OF RELIABILITY THEORY

Conventional pavement design approaches do not fully capture the probabilistic nature of degradation and restoration in structural elements. This study treats a road structure as an integrated system consisting of four serially connected elements — surface course, base, subbase, and subgrade — and explicitly incorporates the hierarchical dependence of restoration: repairing an underlying layer inevitably requires reconstruction of all overlying layers. A two-parameter Weibull distribution describes the degradation of each element, capturing the monotonic increase in failure rate caused by accumulating fatigue and climatic damage. We construct a mathematical model based on Kolmogorov differential equations with time-varying failure rates and constant recovery rates, and we embed the technology-driven hierarchy of repairs directly. The model yields analytical expressions for the

system reliability and an approximate method for calculating the availability factor from mean failure rates. We verify the model against the pavement design for a section of a regional highway of technical category III “Novosibirsk — Kochki — Pavlodar” (Novosibirsk region, Russia). The resulting availability factor equals 0.9935, which exceeds the regulatory threshold of 0.98; the probability of failure-free operation over five years is 0.682 and over twelve years is 0.367. These results can inform feasibility studies of design solutions, help justify overhaul intervals, and support the planning of repair activities.

Key words: road structure, reliability, integrated system, Weibull distribution, availability factor, probability of failure-free operation, time between repairs.

For citation:

Nikulich O. V., Vorobyev V. S. [Methodology for quantitative assessment of road structure reliability using analytical methods of reliability theory]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 3, pp. 81—90. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_81.

About authors:

Oktyabrina V. Nikulich — Postgraduate student, Siberian Transport University (STU). 191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russian Federation; okti888@mail.ru

Valeriy S. Vorobyev — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Siberian Transport University (STU). 191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russian Federation; vorobjev@stu.ru