

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 5. С. 279–290.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (5): 279–290.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.7/.8

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-279-290

EDN: ZMRLKA

К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С УЧЁТОМ ТРЕБУЕМОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Диана Юрьевна Кириллова, Николай Алексеевич Ермошин
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы обеспечения надежности и экономичности дорожных конструкций на этапах проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оптимизации соотношения надежности и экономичности с учетом ограниченности ресурсов и требований к качеству автомобильных дорог.

Цель работы – разработать подход к проектированию дорожных одежд, обеспечивающий заданный уровень надежности при минимальных затратах.

В качестве **метода** используется вероятностный подход, который учитывает случайный характер коэффициента прочности и анализирует его влияние на эксплуатационные характеристики, включая скорость движения транспортных средств. Представлена зависимость между ровностью покрытия, прочностью конструкции и обеспечиваемой скоростью движения. Предложена математическая модель, позволяющая определить оптимальные конструктивные параметры дорожной одежды на основе минимизации приведенных затрат при обеспечении заданной надежности.

Результаты исследования обосновывают выбор проектных решений с учетом эксплуатационных характеристик и экономической эффективности. Сделан вывод о необходимости интеграции оценки надежности и затрат на всех стадиях жизненного цикла автомобильной дороги для повышения эффективности дорожного строительства и эксплуатации.

Ключевые слова: автомобильная дорога, надежность, экономичность, дорожные конструкции, прочность, скорость движения, оптимизация

Для цитирования: Кириллова Д.Ю., Ермошин Н.А. К вопросу обеспечения надёжного проектирования автомобильных дорог с учётом требуемой работоспособности // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 279–290. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-279-290. EDN: ZMRLKA

ORIGINAL ARTICLE

TOWARDS RELIABLE DESIGN OF ROAD PAVEMENTS
WITH REQUIRED EFFICIENCY

Diana Yu. Kirillova, Nikolai A. Ermoshin

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The article addresses the reliability and cost-effectiveness of road pavements during their design, construction, and operation. The relevance of the study is due to the need to optimize the balance between reliability and economy under resource constraints and quality requirements for roads.

Purpose: The aim of this work is to develop a design approach for flexible pavements that ensures a specified level of reliability with minimum costs.

Methodology: The probabilistic method takes into account a random nature of the pavement strength coefficient and its influence on operational characteristics, including travel speed.

Research findings: A relationship is established between pavement evenness, structural strength, and resulting travel speed. A mathematical model is proposed to determine the best pavement parameters based on minimizing life-cycle costs while maintaining the required level of reliability.

Practical implications: The obtained results prove the selected design solutions considering both operational performance and economic efficiency.

Value: The importance of integrating reliability assessment and cost analysis is emphasized for all stages of the road life cycle to improve the overall efficiency of the road construction and maintenance.

Keywords: automobile road, reliability, cost-effectiveness, pavement, strength, travel speed, optimization

For citation: Kirillova D.Yu., Ermoshin N.A. Towards Reliable Design of Road Pavements with Required Efficiency. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 279–290. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-279-290. EDN: ZMRLKA

Введение

Определяющим показателем качества автомобильных дорог является их надежность. Выполнение требований к надежности конструктивных элементов дорожных конструкций и дорожных сооружений обеспечивает функционирование автомобильных дорог с заданными показателями эффективности, безопасности, экологичности и другими характеристиками их качества. Важнейшие показатели надежности автомобильных дорог: безотказность, долговечность и ремонтопригодность. Требуемые значения показателей надежности обеспечиваются конструктивными, технологическими и эксплуатационными способами на стадии проектирования, строительства и содержания дорог. В зависимости от необходимого уровня надежности дорожных конструкций на стадии их проектирования определяются конструктивные параметры, виды и свойства применяемых дорожно-строительных материалов, технологии строительства.

В ходе строительства важным условием обеспечения надежности являются стабильность и точность технологических процессов, а также физико-механические характеристики дорожно-строительных материалов. На стадии эксплуатации необходимо обеспечить своевременное выполнение работ по содер-

жанию автомобильной дороги на основе типовых моделей эксплуатации, разработанной и действующей нормативно-технической документации.

Необходимо отметить, что для автомобильной дороги как технической системы, характеризующейся изнашиванием и старением (рис. 1), при проектировании задаются такие нормативные показатели надежности, как расчетный срок службы дорожной конструкции и расчетный уровень надежности. Однако обеспечение требуемого уровня надежности дорожных конструкций ограничивается условиями финансирования или выделяемыми ресурсами на строительство и эксплуатацию дорожных сооружений. Чем большую надежность автомобильной дороги хотят получить, тем выше затраты на строительство. При меньшей надежности затраты на строительство снижаются, однако возрастают эксплуатационные затраты на более частые и в большинстве своем дорогостоящие ремонты. В связи с этим актуальной является задача разработки методов оптимизации соотношения надежности и экономичности объектов дорожного строительства. Сущность этой задачи сводится к выбору наилучшего варианта дорожной конструкции по комплексному критерию надежности при ограничениях на затраты.

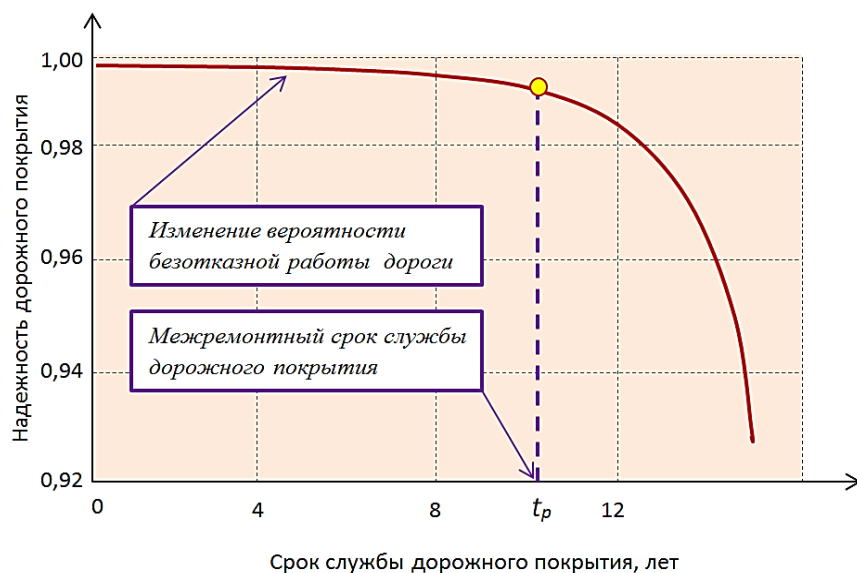


Рис. 1. Динамика надежности работы дорожного покрытия нежесткого типа [1]

Fig. 1. Reliability dynamics of flexible pavement performance [1]

Основная часть

Если принять, что надежность участка автомобильной дороги – это его способность обеспечивать безопасное движение автомобилей с требуемой расчетной скоростью в течение заданного периода времени и при заданных условиях, то можно определить область допустимых показателей надежности, при которых обеспечивается пропуск требуемого объема движения в заданное время при ограничениях затрат на строительство и эксплуатацию дороги.

Известно, что для проектирования автомобильных дорог с требуемой (оптимальной) надежностью необходимо иметь статистические данные об интенсивности отказов. В большинстве случаев такие данные для конкретных условий эксплуатации отсутствуют. Поэтому состояние конструктивных элементов дорожных сооружений и дорожных конструкций можно характеризовать двумя значениями соответствующего выходного параметра ее надежности. Если выходной параметр находится в допустимых пределах, то дорога выполняет свои функции. В противном случае, т. е. когда значение выходного параметра за допустимыми пределами, возникает отказ.

В соответствии с известными правилами установления критериев отказов и предельных состояний технических систем ГОСТ 27.003–2016 категории отказов должны обеспечивать однозначное понимание состояния автомобильной дороги, простоту обнаружения факта отказа, а также последствия наступления отказа. Этим требованиям в наибольшей степени соответствует обеспечиваемая дорогой средняя скорость движения, являющаяся интегральным показателем ее качества. В таком случае отказом автомобильной дороги можно считать выход средней скорости движения за установленные пределы.

В свою очередь, обеспечиваемая дорогой средняя скорость движения (без учета влияния кривых, уклонов, факторов ненадлежащего содержания) зависит от ровности покрытия, а ровность покрытия – от коэффициента прочности дорожной одежды. Однако коэффициент прочности дорожной одежды является случайной величиной, что обусловлено вероятностной природой физико-механических характеристик дорожно-строительных материалов, модуля упругости земляного полотна, технологической изменчивостью толщин конструктивных слоев дорожной одежды и другими факторами.

Основываясь на результатах ранее выполненных исследований [1–3], можно предположить, что значение величины коэффициента прочности (K_n) подчиняется нормальному закону распределения, т. е.

$$f(K_n) = \frac{1}{\sigma_{K_n} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(K_n - \overline{K_n})^2}{2\sigma_{K_n}^2} \right], \quad (1)$$

где $\overline{K_n}$ – математическое ожидание значения величины коэффициента прочности; σ_{K_n} – среднеквадратическое отклонение значения величины коэффициента прочности.

Принятие этого допущения позволяет получить зависимость для определения вероятности отказа дорожной конструкции в зависимости от обеспечиваемой дорогой средней скорости движения \bar{v} . Она может быть определена по формуле [3–5]:

$$\bar{v} = \beta e^{-\frac{\alpha t}{K_n}}, \quad (2)$$

где β и α – коэффициенты, зависящие от типа дорожной конструкции и интенсивности, состава движения; t – время работы дорожной конструкции, лет.

С учетом вероятностного характера K_n определение вида функции плотности распределения скорости движения $\varphi(\bar{v})$ выполняется на основе теории вероятностей с использованием следующей зависимости:

$$\varphi(\bar{v}) = f(\psi(\bar{v})) |\psi'(\bar{v})|. \quad (3)$$

Выполнив преобразование формулы (1) с использованием формул (2) и (3), можно получить функцию плотности распределения \bar{v} :

$$\varphi(\bar{v}) = \frac{1}{\sigma_{K_n} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{\left(\frac{\alpha t}{\ln\left(\frac{\beta}{\bar{v}}\right)} - \overline{K_n} \right)^2}{2\sigma_{K_n}^2} \right] \left[\frac{\alpha t}{\bar{v} \ln\left(\frac{\beta}{\bar{v}}\right)^2} \right]. \quad (4)$$

Тогда вероятность безотказной работы дорожной конструкции в течение времени t определяется следующей зависимостью:

$$R(t) = p(v_d \leq v \leq v_r) = \int_{v_d}^{v_r} \varphi(\bar{v}) d\bar{v}$$

или

$$R(t) = \frac{1}{2} \left\{ \Phi \left[\frac{\frac{\alpha t}{\ln\left(\frac{\beta}{v_r}\right)} - \overline{K_n}}{\sqrt{2\sigma_{K_n}^2}} \right] - \Phi \left[\frac{\frac{\alpha t}{\ln\left(\frac{\beta}{v_d}\right)} - \overline{K_n}}{\sqrt{2\sigma_{K_n}^2}} \right] \right\}, \quad (5)$$

где v_r и v_d – расчетная и минимально возможная скорости движения по дороге с соответствующим значением коэффициента прочности, при котором требуется проведение ремонта дорожного покрытия; t – время работы дорожной конструкции, лет.

При этом вероятность отказа автомобильной дороги $q(t)$, т. е. выхода величины скорости движения v за пороговое значение ($v < v_d$), рассчитывается по формуле

$$q(t) = 1 - R(t). \quad (6)$$

В ходе проектирования автомобильных дорог требуется обеспечить оптимальную надежность $R(t)$ автомобильных дорог с заданной вероятностью $p(t)$. Надежность автомобильной дороги по обеспечению скорости движения в диапазоне от v_d до v_r зависит от характеристик дорожной одежды и земляного полотна. Так, изменение высоты насыпи и физико-механических характе-

ристик грунтов земляного полотна оказывает влияние на конструктивные параметры дорожной одежды. Модуль упругости дорожной одежды возрастает с увеличением высоты насыпи. Это означает, что затраты на устройство дорожной одежды могут быть снижены посредством возведения более высокой насыпи. Аналогично можно оптимизировать стоимость дорожной одежды за счет рационального подбора толщин и материалов ее слоев. Для каждого из вариантов дорожной конструкции (рис. 2) можно подобрать такое сочетание параметров конструктивных элементов (модулей упругости E_i и толщин слоев h_i), которое обеспечит минимизацию стоимости всей конструкции с учетом достижения ее требуемой надежности по прочности K_{Π} , а следовательно, и обеспечиваемой дорогой скорости движения v :

$$K_{\Pi} = \frac{E_{\text{э}}}{E_{\text{тр}}}, \quad (7)$$

где $E_{\text{э}}$ и $E_{\text{тр}}$ – фактический (эквивалентный) и требуемый модули упругости дорожной конструкции.

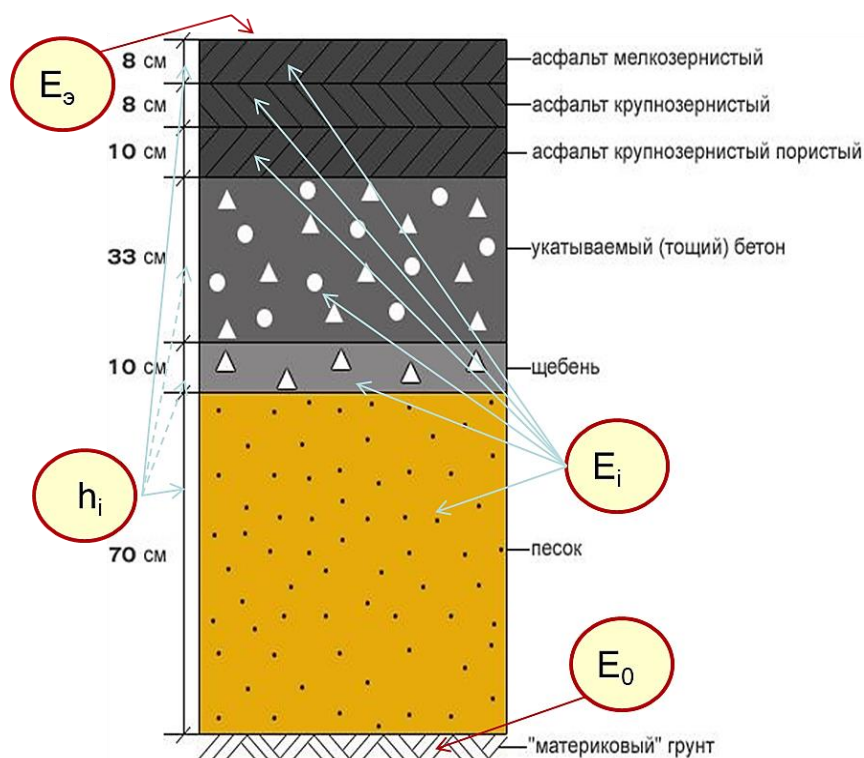


Рис. 2. Вариант дорожной конструкции [2]

Fig. 2. Road pavement structure [2]

При этом за критерий оптимальности соотношения между надежностью и затратами на ее обеспечение можно принять экономически обоснованную ве-

роятность безотказной работы автомобильной дороги по обеспечению скорости движения. Задача экономического обоснования вероятности безотказной работы автомобильной дороги по скорости движения может быть решена исходя из следующих предпосылок [6–9].

Первоначально необходимо определить вид уравнения для суммарных приведенных затрат ($C_{\text{прив}}$) на строительство и эксплуатацию автомобильной дороги (участка). При этом суммарные затраты должны включать стоимость строительства дороги ($C_{\text{стр}}$), потери от дорожно-транспортных происшествий ($C_{\text{дтп}}$), число подверженных отказу j -го вида i -го конструктивного элемента ($j = \overline{1, m}; i = \overline{1, n}$), среднюю стоимость устранения отказа j -го вида для i -го конструктивного элемента (\bar{C}_{ij}), стоимость перевозок по автомобильной дороге ($C_{\text{пер}}$) за срок ее службы. С учетом такой структуры затрат суммарные приведенные затраты можно рассчитать по формуле

$$C_{\text{прив}} = C_{\text{стр}} + C_{\text{дтп}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \bar{C}_{ij} + C_{\text{пер}}. \quad (8)$$

Каждое из слагаемых в формуле (8) в той или иной мере зависит скорости движения v , т. е.

$$v = f(C_{\text{стр}}, C_{\text{дтп}}, \bar{C}, C_{\text{пер}}). \quad (9)$$

Как уже отмечалось, за показатель надежности автомобильной дороги можно принять обеспечиваемую ей скорость дорожного движения. В соответствии с этим значение скорости должно быть не ниже ее минимально возможной величины v_d по дороге с соответствующим значением коэффициента прочности $K_{\text{п}}$, при дальнейшем снижении которого требуется проведение ремонта дорожного покрытия.

Дополнительно следует пояснить, что при воздействии нагрузки на материал нежестких дорожных покрытий при потере упругости в процессе эксплуатации появляются необратимые деформации, вызывающие неровности покрытия, являющиеся причиной снижения скорости движения транспортных средств. Методологические принципы влияния деформаций покрытия на скорость движения рассмотрены в различных источниках [9–12]. На основе этих исследований выявлены характеристики взаимозависимости ровности и прочности дорожных покрытий:

$$r(t) = \frac{0,5r(t_0)}{\sqrt[3]{0,12K_{\text{п}}}} \exp(0,08t), \quad (10)$$

где $r(t)$ и $r(t_0)$ – ровность покрытия на текущий момент времени и начальная ровность покрытия.

Наличие этой зависимости, а также результаты исследований влияния параметров и состояния дороги на скорость движения [4, 5, 12, 13] позволили получить формулу для определения скорости движения в зависимости от ровности и прочности дорожного покрытия:

$$v = \frac{1}{2s} \sqrt{gr(t)^2 (\delta - 1)^2 \frac{p(1 - \bar{\mu}^2) D}{K_{\text{пmin}} E_{\text{тр}}}}, \quad (11)$$

где s – допустимая необратимая деформация покрытия; g – ускорение свободного падения; δ – допустимый динамический коэффициент для скорости v_r (характеризует отношение матожидания модуля относительной скорости подрессоренных и неподрессоренных масс расчетной нагрузки к скорости ее движения по ОДМ 218.11.001–2015); p – статическое давление колеса расчетной нагрузки (автомобиля); $\bar{\mu}$ – математическое ожидание коэффициента Пуассона дорожной одежды; $K_{\text{пmin}}$ – минимально допустимое значение коэффициента прочности дорожной одежды; D – диаметр отпечатка колеса расчетной нагрузки (автомобиля).

Установление взаимосвязи характеристик прочности, ровности дорожного покрытия как одного из основных конструктивных элементов дорожной конструкции и скорости движения по автомобильной дороге позволяет сформулировать математическую постановку задачи оптимизации соотношения прочности и надежности. Суть такой постановки состоит в следующем.

Пусть требуется обеспечить надежность дорожной конструкции $R(v_d)$ не ниже некоторого минимального значения $R^*(v_d)$, при котором автомобильная дорога продолжает выполнять свои функции. Величина $R^*(v_d)$ может рассматриваться как число или область допустимых значений. Для выполнения мероприятий по обеспечению надежности дорожной конструкции выделяются ограниченные финансовые средства $C^*(v_d)$. Требуется определить уровень надежности дорожной конструкции, при котором $R(v_d) \geq R^*(v_d)$ и $C(v_d) \leq C^*(v_d)$.

Решение сформулированной задачи сводится к тому, что изначально назначается несколько вариантов дорожной конструкции и с использованием приведенных зависимостей рассчитывается их надежность. При неудовлетворительной надежности выбираются конструктивные решения (мероприятия) по ее увеличению. При этом для каждого i -го конструктивного решения (мероприятия) рассчитываются затраты на его реализацию $\Delta C_i(v_d)$ и приращение надежности $\Delta R_i(v_d)$. Среди конкурирующих вариантов конструктивных решений по повышению надежности выбирается вариант, имеющий наибольшее значение отношения $\Delta R_i(v_d) / \Delta C_i(v_d)$. Далее расчет надежности дорожной конструкции повторяется с учетом принятого конструктивного решения.

Поскольку в соответствии с зависимостями (7) и (8) приращение надежности имеет стоимостной эквивалент (суммарные приведенные затраты, $C_{\text{прив}}$), а ущерб от отказа дорожной одежды как основного элемента дорожной конструкции соизмерим с затратами на ее устройство, максимальное значение абсолютного эффекта ΔQ_i от приращения надежности по i -му конструктивному решению $\Delta R_i(v_d)$ можно определить по зависимости

$$\Delta Q_i = C_{\text{прив}} - \Delta C_i(v_d). \quad (12)$$

В случае, когда важно в качестве критерия выбора решения по обеспечению надёжности принимать количество затраченных средств на единицу эффекта ΔQ_i^* , расчет выполняется по формуле

$$\Delta Q_i^* = \frac{\Delta R_i(v_d)}{\Delta C_i(v_d)}. \quad (13)$$

После определения варианта конструктивного решения с максимальным эффектом необходимо вновь проверить выполнение ограничения на выделенное финансирование ($C(v_d) \leq C^*(v_d)$). Если ограничение не нарушается, то принимается вариант конструктивного решения с максимальным значением ΔQ_i^* . При этом обязательно проверяется выполнение ограничения по обеспечению требуемой надёжности $R(v_d) \geq R^*(v_d)$. Невыполнение этого ограничения свидетельствует о необходимости поиска новых вариантов конструкции, обеспечивающих значение надёжности не ниже чем $R^*(v_d)$. Отсутствие возможного варианта решения, удовлетворяющего ограничениям по надёжности и стоимости, требует пересмотра исходных данных. В случае соответствия выбранной конструкции ограничениям на стоимость и надёжность принимается решение, обеспечивающее самый высокий уровень надёжности $R_{\text{опт}}(v_d)$ с учетом выделенного финансирования.

В общем случае зависимость надёжности автомобильной дороги через показатель v_d от суммарных приведенных затрат ($C_{\text{прив}}$) на ее строительство и эксплуатацию может быть представлена графически (рис. 3).

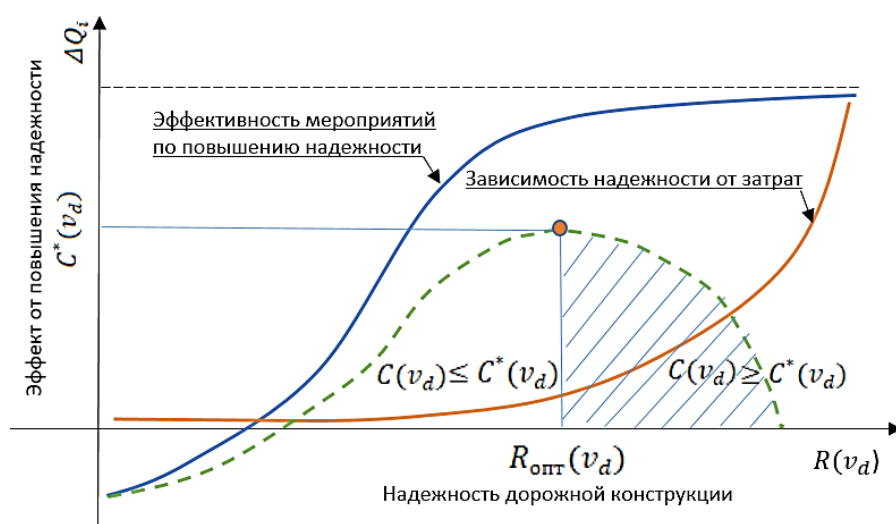


Рис. 3. Взаимосвязь надёжности и экономичности дорожных конструкций
Fig. 3. Dependences between reliability and cost-effectiveness of road pavement

Заключение

Результаты теоретических и экспериментальных исследований надежности автомобильных дорог свидетельствуют о том, что надежность дороги определяется выполнением мероприятий по обеспечению прочности и ровности дорожных покрытий. Динамика ровности покрытия за время его эксплуатации зависит от физико-механических характеристик основания дорожной одежды и земляного полотна. Вместе с тем повышение прочности и достижение ровности покрытий посредством устранения их дефектов при минимально допустимом фактическом модуле упругости и формировании значительных деформаций требуют реализации дорогостоящих конструктивных решений. Поэтому надежность дорожных конструкций должна обеспечиваться на стадии их проектирования, а также путем недопущения технологических дефектов на стадии строительства и своевременным выполнением мероприятий в период содержания дороги.

Проектирование автомобильных дорог должно исходить из оптимальной надежности дорожных конструкций, т. е. обеспечения расчетной скорости движения в межремонтный период с заданной вероятностью. Повышение надежности автомобильных дорог при проектировании должно осуществляться на основе опыта их эксплуатации, исключения возможности применения материалов с низкой долговечностью, создания запаса прочности дорожных конструкций с учетом их экономичности. При этом следует руководствоваться принципами рационального распределения затрат по стадиям жизненного цикла автомобильной дороги.

Таковы основные принципы концептуального подхода к определению оптимального соотношения надежности и экономичности конструктивных элементов автомобильных дорог. Дальнейшим направлением исследований в этой области является установление аналитических зависимостей надежности дорожной конструкции от вариантов проектных решений и затрат на их реализацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермошин Н.А., Громов В.А. Методологические аспекты управления надежностью строительства и эксплуатации автомобильных дорог // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2. С. 27–32. EDN: WEZJLD
2. Ермошин Н.А., Романчиков С.А., Аверьянов Д.А. Имитационное моделирование риска разрушения дорожных конструкций в межремонтный период // Путь навигатор. 2022. № 50. С. 30–41. EDN: LNFPMN
3. Ярмолинский В.А., Украинский И.С. Теоретические предпосылки повышения надежности дорожных конструкций с армирующими прослойками из ГМ // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : международный сборник научных трудов. Т. 14. Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2014. С. 87–90. EDN: TCBHUF
4. Буртыль Ю.В., Леонович И.И. Взаимозависимости ровности покрытия и прочности дорожной одежды // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2011. № 2. С. 86–92. EDN: JDBSES
5. Буртыль Ю.В., Капский Д.В. Моделирование взаимосвязи ровности и прочности жестких дорожных одежд на основании теоретическо-практических исследований // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2022. Т. 19. № 4. С. 570–583. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583. EDN: MGXUAY
6. Кузнецова О.А., Ермошин Н.А., Царева О.С., Бирюков О.Р. Концептуальный подход к определению оптимального соотношения надежности и экономичности конструктивных

- элементов автомобильных дорог // Неделя науки ИСИ : материалы Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 26–30 апреля 2021 г. В 3 частях. Часть 2. Санкт-Петербург : СПбПУ, 2021. С. 302–305. EDN: PLBBDY
7. Попов Н.А., Осокин Н.А. Совершенствование механизмов управления дорожным обслуживанием в Российской Федерации // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2020. Т. 11. № 3. С. 304–315. DOI: 10.17747/2618-947X-2020-3-304-315. EDN: UUPVBN
 8. Моисеенко Р.П., Ефименко В.Н. К оценке долговечности автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 207–213. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-207-213. EDN: IPEWWD
 9. Каменчуков А.В. Влияние качества дорожного покрытия на скорость движения // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения : международный сборник научных трудов. Т. 17. Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2017. С. 192–194. EDN: OTGXJD
 10. Питухин А.В., Петров А.Н. Влияние ровности покрытий на работоспособность автомобильных дорог // Транспортное дело России. 2010. № 5. С. 71–75. EDN: QYRFPN
 11. Стеценко Д.Б., Rogozina Ю.В., Фотиади А.А. Прогнозирование ровности дорожных одежд // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук : сборник докладов Национальной конференции с международным участием, Белгород, 18–20 мая 2022 г. Часть 9. Белгород : БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. С. 328–333. EDN: EORUAV
 12. Золотарь И.А., Некрасов В.К., Коновалов С.В., Яковлев Ю.М., Коганзон М.С. Повышение надежности автомобильных дорог. Москва : Транспорт, 1977. 183 с.
 13. Смирнов А.В., Малышев А.А., Агалаков Ю.А. Механика устойчивости и разрушения дорожных конструкций. Омск : СибАДИ, 1997. 91 с.

REFERENCES

1. Ermoshin N.A., Gromov V.A. Methodological Aspects of Safety Risk Management in Road Construction and Operation. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2016; 2 (55): 27–32. EDN: WEZJLD (In Russian)
2. Ermoshin N.A., Romanchikov S.A., Averyanov D.A. Simulation Modeling of Road Structure Failure Risk During Inter-Repair Period. *Putevoy navigator*. 2022; 50 (76): 30–41. EDN: LNFPKN (In Russian)
3. Yarmolinsky V.A., Ukrainsky I.S. Theoretical Prerequisites for Reliability of Road Pavements with Reinforcing Geosynthetic Interlayers. In: Coll. Papers “Far East. Automobile Roads and Traffic Safety”, Vol. 14, A.I. Yarmolinskii Ed., Khabarovsk, 2014. Pp. 87–90. EDN: TCBHUF (In Russian)
4. Burtul Yu.V., Leonovich I.I. Interdependencies between Pavement Evenness and Road Pavement Strength. *Trudy BGUTU. Lesnaya i derevoobrabatывayushchaya promyshlennost*. 2011; 2: 86–92. EDN: JDBSES (In Russian)
5. Burtul Yu.V., Kapsky D.V. Modelling the Relationship of Smoothness and Resistibility in Non-Rigid Pavements based on Theoretical and Practical Studies. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*. 2022; 19 (4): 570–583. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583. EDN: MGXUAY (In Russian)
6. Kuznetsova O.A., Ermoshin N.A., Tsareva O.S., Biryukov O.R. Conceptual approach to determining the optimal ratio of reliability and cost-effectiveness of highway structural elements. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. ‘Science Week at the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University’*, in 3 vol., Saint-Petersburg, 2021. Pp. 302–305. EDN: PLBBDY (In Russian)
7. Popov N.A., Osokin N.A. Improvement of Road Maintenance Management in Russia. *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment*. 2020; 11 (3): 304–315. DOI: 10.17747/2618-947X-2020-3-304-315. EDN: UUPVBN (In Russian)
8. Moiseenko R.P., Efimenko V.N. Towards Durability of Automobile Roads. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019; 21(3): 207–213. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-3-207-213. EDN: IPEWWD (In Russian)

9. *Kamenchukov A.V.* Influence of Road Surface Quality on Traffic Speed. Coll. Papers "Far East. Automobile Roads and Traffic Safety", Vol. 17, Khabarovsk, 2017. Pp. 192–194. EDN: OTGXJD (In Russian)
10. *Pitukhin A.V., Petrov A.N.* The Impact of Pavement Smoothness on Road Performance. *Transportnoe delo Rossii*. 2010; 5: 71–75. EDN: QYRFPH (In Russian)
11. *Stetsenko D.B., Rogozina Yu.V., Fotiadi A.A.* Prediction of Pavement Evenness. In: *Proc. Int. Sci. Conf. of Young Scientists*. Belgorod, 2022. Pp. 328–333. EDN: EORUAV (In Russian)
12. *Zolotar I.A., Nekrasov V.K., Konovalov S.V., Yakovlev Yu.M., Koganzon M.S.* Reliability Improvement of Motorways. Moscow: Transport, 1977. 183 p. (In Russian)
13. *Smirnov A.V., Malyshev A.A., Agalakov Yu.A.; ed. by Smirnov A.V.* Mechanics of Stability and Failure of road Pavements. Omsk, 1997. 91 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Кириллова Диана Юрьевна, ст. преподаватель, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, 29, литера Б, kirdiana@mail.ru

Ермошин Николай Алексеевич, докт. воен. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, 29, литера Б, ermonata@mail.ru

Authors Details

Diana Yu. Kirillova, Senior Lecturer, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnikeskaya Str., 195251, St-Petersburg, Russia, kirdiana@mail.ru

Nikolai A. Ermoshin, DSc, Professor, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnikeskaya Str., 195251, St-Petersburg, Russia, ermoshin_na@spbstu.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.06.2025
Одобрена после рецензирования 18.07.2025
Принята к публикации 03.09.2025

Submitted for publication 03.06.2025
Approved after review 18.07.2025
Accepted for publication 03.09.2025