

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

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

<https://doi.org/10.17816/transsyst684014>

© Г.Л. Огурцов, Н.А. Ермошин, А.М. Исмаилов

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

ПРИМЕНЕНИЕ ТАКСОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ОЦЕНКЕ СТРАТЕГИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ

Цель. Разработка метода сравнительного анализа представительной выборки вариантов стратегий эксплуатации пролетного строения по совокупности разнородных признаков, характеризующих их надежность и экономичность, а также определение оптимального сочетания технических и технологических решений для обеспечения установленного расчетного срока службы.

Материалы и методы. Одним из основных технико-экономических показателей при выборе стратегии эксплуатации пролетного строения мостовых сооружений является стоимость проводимых ремонтно-восстановительных работ для достижения требуемых значений показателей надежности. Выбор рациональных мероприятий эксплуатации пролетных строений мостовых сооружений должен основываться на применении методов, учитывающих как многообразие и неоднородность факторов обеспечения их эксплуатационной надежности, так и стохастическую природу этих факторов. Для решения этой задачи предлагается метод оценки стратегии обеспечения эксплуатационной надежности железобетонных пролетных строений мостов, базирующийся на совокупности методов таксономического, инвестиционного анализа и теории рисков.

Результаты. Получена аналитическая модель, позволяющая определять оптимальную стратегию эксплуатации пролетного строения, основываясь на разнородных признаках, характеризующих надежность и экономичность, в которой установление количественных показателей надежности выполнено с помощью имитационного моделирования работы пролетного строения, учитывающего совместное влияние неопределенностей, обусловленных естественной вариативностью прочностных и деформационных параметров главных балок, стохастическим характером деградиационных процессов и режимов нагружения.

Заключение. Представленный метод оценки стратегии эксплуатации пролетных строений, а также результаты, полученные при его апробации, позволяют эксплуатирующим дорожно-строительным организациям определять требуемые технические и технологические решения по обеспечению показателей надежности пролетных строений, а также прогнозировать сроки, состав и стоимость ремонтно-восстановительных работ в течение требуемого срока службы.

Ключевые слова: надежность; долговечность; безотказность; ремонтпригодность; пролетное строение; транспортное строительство; стратегии эксплуатации.

Как цитировать:

Огурцов Г.Л., Ермошин Н.А., Исмаилов, А.М. Применение таксономического анализа при оценке стратегии эксплуатации пролетного строения // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 3. С. 396–408. doi: 10.17816/transsyst684014

Section 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

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

© **G.L. Ogurtsov, N.A. Ermoshin, A.M. Ismailov**
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

TAXONOMIC ANALYSIS IN EVALUATING THE SUPERSTRUCTURE OPERATION STRATEGY

AIM: The work aimed to develop a comparative analysis method for a representative sample of operating strategy options of a superstructure based on a set of heterogeneous parameters of their reliability and cost-effectiveness and determine the optimal combination of engineering and process solutions to ensure the specified design service life.

METHODS: One of the main feasibility indicators used to select an operation strategy for the bridge superstructure is the cost of the repair and restoration performed to achieve the required reliability. The choice of reasonable operation options for bridge superstructures should be based on the methods considering both the diversity and heterogeneity of factors ensuring their reliability and the stochastic nature of these factors. To solve this problem, we propose a method to assess the reliability strategy of reinforced concrete bridge superstructures based on a combination of taxonomic and investment analysis methods and risk theory.

RESULTS: The study provides an analytical model that allows determining the optimal superstructure operation strategy based on heterogeneous reliability and cost-efficiency parameters. The quantitative reliability is determined by simulation modeling of the superstructure structure operation based on the combined influence of uncertainties caused by the natural variability of the strength and deformation of the girders and the stochastic nature of degradation and load conditions.

CONCLUSION: The proposed assessment method of the superstructure operation strategy and its testing results allow the operating road builders to determine the required engineering and process solutions to ensure the reliability of superstructures and to predict the timing, works, and cost of repair and restoration during the specified service life.

Keywords: reliability; durability; failure-free operation; serviceability; superstructure; transport construction; operation strategies.

To cite this article:

Ogurtsov GL, Ermoshin NA, Ismailov AM. Taxonomic analysis in evaluating the superstructure operation strategy. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(3):396–408. doi: 10.17816/transsyst684014

ВВЕДЕНИЕ

Действующими нормативно-техническими документами предлагается обосновывать мероприятия по восстановлению и поддержанию работоспособного состояния пролетного строения, основываясь на вариантном проектировании. При этом основным показателем при осуществлении выбора является стоимость выполняемых работ при удовлетворении усредненных требований, установленных нормативными документами технического регулирования. Однако данный подход в условиях вероятностного характера условий проектирования, строительства и эксплуатации мостовых сооружений не всегда обеспечивает требуемые показатели эксплуатационной надежности технических и технологических решений по обеспечению работоспособного состояния пролетных строений [1, 2]. Причиной этому является отсутствие возможности нормативного подхода учитывать флуктуации параметров конструкционных материалов и технологических процессов в пределах установленных норм. В особенности это касается ситуаций, когда характеристики материалов и технологических процессов находятся на уровне минимальных значений с точки зрения их качества.

В соответствии с этим выбор рациональных технических и технологических решений предлагается осуществлять, основываясь на таксономическом анализе вариантов стратегий эксплуатации. Естественно, решение должно приниматься на основе всевозможных сочетаний факторов обеспечения показателей эксплуатационной надежности. Таксономический анализ позволяет определить близкую к оптимальной стратегию эксплуатации пролетного строения мостового сооружения, основываясь на разнородных свойствах, таких как технико-экономические, организационные и социально-экономические [3, 4].

К основным показателям надежности пролетного строения в процессе эксплуатации относятся долговечность, безотказность и ремонтпригодность [5–7]. Данные показатели надежности можно декомпозировать на более простые исчисляемые признаки, такие как гамма-процентный срок службы, вероятность безотказной работы, среднее время наработки на отказ, определяемые по группам предельных состояний, а также время простоя, которое зависит от применяемых технических и технологических решений. Поскольку выходные параметры системы пролетного строения являются многомерными случайными величинами, то установление их количественных характеристик рационально выполнить с помощью имитационного моделирования [8–10] для каждого технического и технологического решения и их сочетаний.

Неудовлетворительное техническое состояние пролетного строения мостового сооружения может быть вызвано недостаточным или ограниченным финансированием [11, 12], а также проблемами, связанными с отсутствием в нормативно-технической документации методов и методик прогнозирования технического состояния и накопления дефектов. Оценка технического состояния пролетного строения и выявление необходимости проведения ремонтно-восстановительных работ осуществляется в процессе эксплуатации по результатам технического обследования. При неудовлетворительных результатах эксплуатирующей дорожной организацией вводятся ограничения

транспортно-эксплуатационных характеристик участка автомобильной дороги, а восстановление потребительских свойств происходит через некоторое время, когда будет сформирован бюджет на выполнение ремонтно-восстановительных работ. В процессе эксплуатации пролетного строения с ограниченными транспортно-эксплуатационными характеристиками увеличивается интенсивность накопления дефектов пролетного строения, что может привести к его частичному и полному отказам. Следовательно, при выборе стратегии эксплуатации помимо значений показателей надежности следует определять экономичность технических и технологических решений (Рис. 1). Экономичность выражается через общие затраты на содержание пролетного строения, которые возможно прогнозировать с учетом дисконтирования начальной стоимости к моменту производства работ.

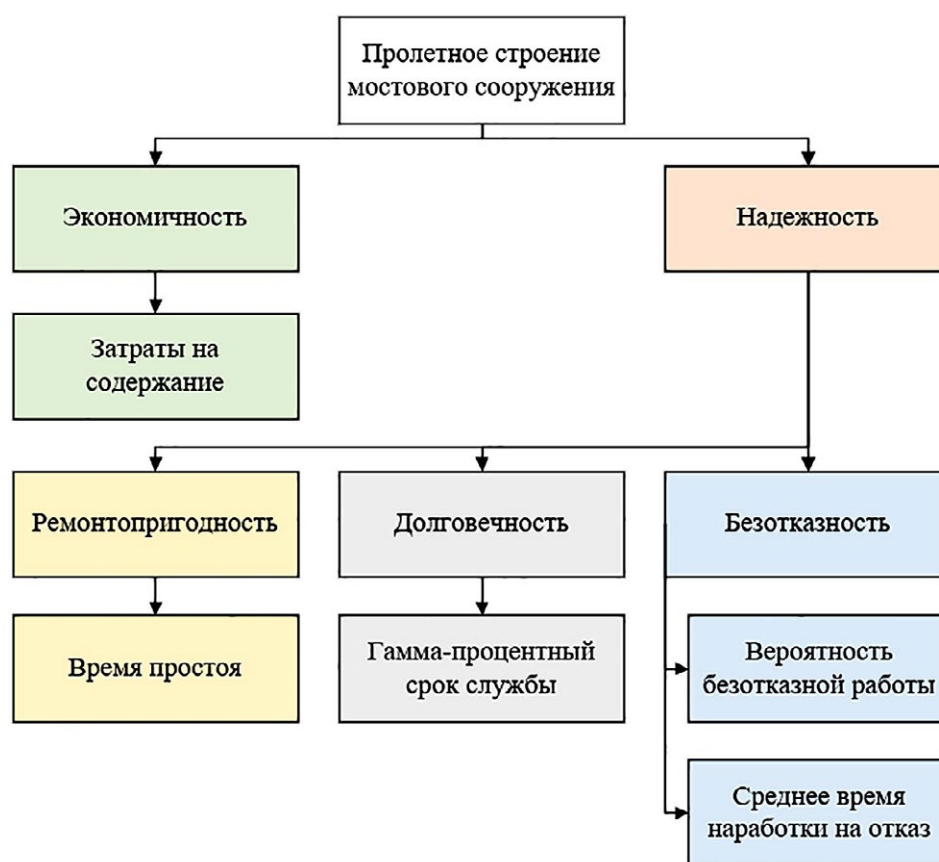


Рис. 1. Дерево признаков пролетного строения

Fig. 1. Tree of superstructure attributes

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Сущность таксономического анализа состоит в определении расстояний между признаками транспортно-эксплуатационного состояния двух сравниваемых объектов – представленным в выборке для конкретного эксплуатируемого сооружения и эталоном [13]. В качестве эталона принимается многомерное пространство, параметры координат которого

по транспортно-эксплуатационному состоянию соответствуют наилучшим значениям показателей эксплуатационной надежности технических и технологических решений. В соответствии с указанным обстоятельством чем меньше расстояния между сравниваемыми значениями показателей у конкретного объекта и эталона, тем более близки свойства этих объектов.

Для практической реализации предлагаемого метода выборку основных признаков вариантов стратегий эксплуатации пролетного строения необходимо представить в виде матрицы:

$$X = \|X_{ij}\|, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m, \quad (1)$$

где n и m – число стратегий эксплуатации в выборке и признаков каждого технического и технологического решения, соответственно.

Поскольку значения величин признаков стратегий эксплуатации являются разноразмерными, то их необходимо преобразовать в безразмерные значения. Преобразование признаков к нормированным безразмерным значениям выполняется по следующей формуле:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{M}_j}{\sigma_j}, \quad (2)$$

где $\bar{M}_j$ и σ_j – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение признака, соответственно.

Определение координат эталонной стратегии эксплуатации в многомерном пространстве выполняется с учетом направленности векторов признаков, то есть стремления максимизировать или минимизировать значение. В связи с чем среди нормированных безразмерных значений признаков необходимо определить лучшие. Поиск координат эталонной стратегии эксплуатации выполняется согласно формуле:

$$Z_{0j} = \begin{cases} \max Z_{ij} \\ \min Z_{ij} \end{cases}, \quad (3)$$

где признаки классифицируются в соответствии с Табл. 1.

Расстояние от рассматриваемой стратегии эксплуатации до эталонной определяется согласно:

$$C_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(Z_{ij} - Z_{0j} \right)^2}. \quad (4)$$

Чем меньше значение C_i сравниваемой стратегии эксплуатации, тем ближе она располагается к эталону. Поскольку конкретное расстояние не представляет

Таблица 1. Признаки стратегии эксплуатации пролетного строения**Table 1.** Attributes of a superstructure operation strategy

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Классификация
Долговечность			
1	Гамма-процентный срок службы по ширине раскрытия трещин до проведения ремонтно-восстановительных работ	лет	Максимизируется
2	Гамма-процентный срок службы по вертикальным перемещениям до проведения ремонтно-восстановительных работ	лет	
3	Гамма-процентный срок службы по несущей способности до проведения ремонтно-восстановительных работ	лет	
Безотказность			
4	Вероятность безотказной работы по ширине раскрытия трещин на 100 год эксплуатации	-	Максимизируется
5	Вероятность безотказной работы по вертикальным перемещениям на 100 год эксплуатации	-	
6	Вероятность безотказной работы по несущей способности на 100 год эксплуатации	-	
7	Среднее время наработки на отказ по ширине раскрытия трещин до проведения ремонтно-восстановительных работ	лет	Максимизируется
8	Среднее время наработки на отказ по вертикальным перемещениям до проведения ремонтно-восстановительных работ	лет	
9	Среднее время наработки на отказ по несущей способности до проведения ремонтно-восстановительных работ	лет	
Ремонтопригодность			
10	Время простоя	лет	Минимизируется
Экономичность			
11	Суммарная стоимость выполнения работ	руб.	Минимизируется

однозначной характеристики степени удаленности от эталонной стратегии, то требуется определить нормировку расстояния. Нормированное расстояние вычисляется по формуле:

$$D_i = \frac{C_i}{C_{\max}}, \quad (5)$$

где $C_{\max}$ – максимально возможное расстояние, вычисляемое по правилу «трех сигм».

Оптимальной стратегией эксплуатации в выборке является та, у которой достигается максимальное значение уровня подобия. Значение уровня подобия вычисляется по формуле:

$$m_{onm} = \arg \max (1 - D_i). \quad (6)$$

Суммарная стоимость выполнения работ определяется для каждой стратегии эксплуатации с учетом времени проведения работ и включает в себя стоимости работ для периода превентивных мер и периода преждевременных отказов. В течение периода превентивных мер выполняется комплекс технико-технологических решений, препятствующих коррозии арматуры, т.е. окраска открытых бетонных поверхностей и замена пораженного атмосферными газами защитного слоя бетона [14–16]. В случае, когда окончание периода превентивных мер оказывается меньше расчетного срока службы, то по его окончанию применяются мероприятия, повышающие прочностные и деформационные характеристики главных балок пролетного строения, такие как устройство внешнего армирования и устройство дублирующих элементов.

Затраты для стратегии эксплуатации с учетом индексации в течение срока службы пролетного строения определяются согласно формуле:

$$C_{PBP} = \sum_{j=1}^m \frac{IC_t}{(1+i)^t} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где IC_t – стоимость выполнения работ в момент времени t ; i – ставка дисконтирования (расчет ставки дисконтирования выполняется по известной модели оценки капитальных активов CAPM).

Момент времени проведения таких работ принимается равным гамма-процентному сроку службы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта апробации выбрано железобетонное пролетное строение, расположенное в г. Санкт-Петербург. Входными параметрами при проведении имитационного моделирования являются внешние факторы окружающей среды, конструктивно-технологические характеристики главных балок пролетного строения и транспортно-эксплуатационные характеристики автомобильной дороги, а именно: температура и влажность окружающей среды, количество дней в году с осадками более 2,5 мм, предел прочности бетона на одноосное сжатие, площадь поперечного сечения арматуры, предел прочности арматуры, модуль упругости арматуры, содержание цемента в бетоне, содержание воды в бетоне, начальный коэффициент диффузии углекислого газа, содержание углекислого газа в атмосфере, начальный коэффициент диффузии ионов хлорида, концентрация хлоридов на поверхности бетона защитного слоя, состав и интенсивность транспортных средств.

Показатели долговечности и безотказности пролетного строения определены на основании имитационного моделирования работы главных балок с учетом его структурной схемы надежности для каждого технико-технологического решения. В течение периода превентивных мер рассмотрены следующие стратегии эксплуатации:

1. без применения мероприятий по защите;
2. окрашивание открытых бетонных поверхностей на нулевом, 25 и 50 годах эксплуатации;
3. замена защитного слоя толщиной 40 мм на 30 и 60 годах эксплуатации;
4. комбинированный подход, включающий в себя окрашивание открытых бетонных поверхностей на нулевом году, и замена защитного слоя толщиной 42 мм на 64 году эксплуатации с последующим окрашиванием.

Для каждой стратегии эксплуатации определены статические характеристики и установлены аппроксимирующие функции распределения времени наработки на отказ пролетного строения. На основании установленных зависимостей получены средние и гамма-процентные сроки службы (Табл. 2), которые свидетельствуют о том, что применение превентивных мероприятий недостаточно для обеспечения работоспособного состояния пролетного строения в течение заданного срока эксплуатации.

Таблица 2. Средний и гамма-процентный сроки службы для превентивного периода времени

Table 2. Average and gamma-percentile service life for a preventive period

Механизм разрушения	Номер стратегии эксплуатации для периода превентивных мер:			
	1	2	3	4
Средний срок службы, лет				
По ширине раскрытия трещин	76,22	82,88	83,37	82,71
По вертикальным перемещениям	73,77	79,62	80,14	80,90
По несущей способности	81,51	91,75	91,57	90,95
Гамма-процентный срок службы, лет				
По ширине раскрытия трещин	70,31	75,31	75,41	74,70
По вертикальным перемещениям	68,29	73,34	72,79	73,84
По несущей способности	75,33	82,00	81,91	80,98

Для обеспечения расчетного срока службы необходимо применение мероприятий, повышающих прочностные и деформационные характеристики главных балок пролетного строения, таких как:

1. устройство внешнего армирования из металлических уголков;
2. устройство внешнего армирования из углепластиковых ламелей;

3. устройство внешнего армирования из напрягаемых канатов;
4. устройство дублирующих элементов главных балок.

Вероятности безотказной работы для расчетного срока эксплуатации (100 лет) определены методом Монте-Карло по установленным механизмам разрушения пролетного строения для каждого сочетания технических и технологических решений (Табл. 3).

Таблица 3. Вероятность безотказной работы пролетного строения на 100 год эксплуатации

Table 3. Probability of failure-free operation of the superstructure at operation year 100

Номер стратегии эксплуатации	Механизм разрушения		
	По ширине раскрытия трещин	По вертикальным перемещениям	По несущей способности
1.1	0,989	0,518	0,999
1.2	0,196	0,008	0,999
1.3	0,999	0,492	0,999
1.4	0,999	0,999	0,999
2.1	0,999	0,899	0,999
2.2	0,848	0,328	0,999
2.3	0,999	0,999	0,999
2.4	0,999	0,999	0,999
3.1	0,999	0,874	0,999
3.2	0,846	0,329	0,999
3.3	0,999	0,999	0,999
3.4	0,999	0,999	0,999
4.1	0,999	0,888	0,999
4.2	0,860	0,382	0,999
4.3	0,999	0,999	0,999
4.4	0,999	0,999	0,999

Расчет затраты на содержание пролетного строения и времени простоя выполнено в соответствии с федеральными сметными нормативами для каждого вида работ. Затраты на содержание пролетного строения вычислены с учетом ставки дисконтирования по формуле (7) на момент производства работ, принятый равным гамма-процентным срокам службы.

Результаты таксономического анализа (Табл. 4) позволяют сделать вывод о том, что оптимальной стратегией эксплуатации пролетного строения является замена защитного слоя толщиной 40 мм на 30 и 60 гт с последующим устройством внешнего армирования из напрягаемых канатов на 81 г.

Таблица 4. *Результаты таксономического анализа***Table 4.** *Taxonomic analysis*

Номер стратегии эксплуатации	Уровень развития для стратегии	Ранг
1.1	0,346	13
1.2	0,175	16
1.3	0,343	14
1.4	0,310	15
2.1	0,725	7
2.2	0,658	10
2.3	0,727	6
2.4	0,616	12
3.1	0,849	2
3.2	0,748	3
3.3	0,854	1
3.4	0,693	8
4.1	0,730	5
4.2	0,675	9
4.3	0,732	4
4.4	0,620	11

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение таксономического анализа совместно с имитационным моделированием позволяет определить оптимальное сочетание технических и технологических решений по обеспечению показателей эксплуатационной надежности пролетных строений мостового сооружения и транспортно-эксплуатационных характеристик автомобильной дороги, на которой оно расположено, а также прогнозировать сроки, состав и стоимость ремонтно-восстановительных работ в течение требуемого срока службы. На основании результатов имитационного моделирования работы пролетного строения, выполнена апробация таксономического анализа технических и технологических решений для железобетонного мостового сооружения, расположенного в Санкт-Петербурге, и определены требуемые мероприятия по обеспечению показателей эксплуатационной надежности.

Авторы заявляют что:

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

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелёхин В.Б., Магдиев А.Ш. Методологические основы оценки качества строительной продукции // Вестник евразийской науки. 2014. №. 4(23). С. 114. EDN: TCFNOB
2. Спиридонов Э.С., Духовный Г.С., Логвиненко А.А. и др. Научные подходы к оценке качества продукции строительства транспортных объектов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. №. 2. С. 113–116. EDN: KWCYKL
3. Махутов Н.А., Резников Д.О. Комплексный анализ прочности и безопасности потенциально опасных объектов с учетом неопределенностей // Надежность. 2020. № 1. С. 47–56. doi: 10.21683/1729-2646-2020-20-1-47-56 EDN: BZBQMC
4. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Алексеев А.А. К вопросу надежности несущих балок пролетных строений мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25, №. 6. С. 183–195. doi: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-183-195 EDN: ХАСQYX
5. Кошелева Ж.В., Михалевич Н.В. Расчет надежности пролетного железобетонного моста в период эксплуатации // Эффективные строительные конструкции: теория и практика. 2021. С. 71–75.
6. Ахмедов Ш.Б., Алменов Х., Шожалилов Ш.Ш. и др. Оценка сроков службы конструкций пролетных строений при прогнозировании долговечности железобетонных мостов // Научный журнал транспортных средств и дорог. 2021. Т. 1, №. 4. С. 6–8.
7. Морозова Л.Н., Пархоменко В.В. Определение долговечности железобетонных автодорожных мостов // Вести Автомобильно-дорожного института. 2022. Т. 40, №. 1. С. 41–45. EDN: OVJDYN
8. Ахмедов Р.М., Махмудов О. Методы планирования и управление ремонтом мостов // Экономика и социум. 2021. Т. 90, №. 11-1. С. 774–788. EDN: QVNNIG
9. Огурцов Г.Л., Ермошин Н.А., Бирюков О.Р. Применение имитационного моделирования для оценки долговечности балок пролетного строения железобетонных мостов // Вестник СГУПС. 2025. Т. 73, № 1. С. 104–113. doi: 10.52170/1815-9265_2025_73_104
10. Li C.Q., Ian Mackie R., Lawanwisut W. A risk-cost optimized maintenance strategy for corrosion-affected concrete structures // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2007. Vol. 22, N. 5. P. 335–346. doi: 10.1111/j.1467-8667.2007.00490.x
11. Артюхов А.А. Анализ деятельности администрации ленинского района города Екатеринбург по благоустройству территории // ГОСРЕГ: Государственное регулирование общественных отношений. 2022. Т. 40, №. 2. С. 120–126. EDN: KXYXUX
12. Гулицкая Л.В., Шиманская О.С. Актуальные проблемы эксплуатации железобетонных плитных мостовых сооружений. В кн.: XI Форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства: сборник материалов, г. Минск, 12-16 декабря 2022 г. Минск: БНТУ 2023. С. 108–110. EDN ENNCUY

13. Гулай, А.В., Зайцев В.М. Синтез таксономической схемы для идентификации состояний сложных систем // Искусственный интеллект и принятие решений. 2019. № 2. С. 84–90. doi: 10.14357/20718594190208 EDN: ZXFVCSJ
14. Ахроров Ш.А.У., Овчинников И.И. Повышение долговечности железобетонных мостовых сооружений (первичная и вторичная защита) // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14, №. 3. С. 21. EDN: CSWOIQ
15. Bastidas-Arteaga E., Schoefs F., Chateauneuf A. et al. Probabilistic evaluation of the sustainability of maintenance strategies for RC structures exposed to chloride ingress // International Journal of Engineering Under Uncertainty: Hazards, Assessment and Mitigation. 2010. Vol. 2, N. 1-2. P. 61–74.
16. Bastidas-Arteaga E. Contribution for sustainable management of reinforced concrete structures subject to chloride penetration. [dissertation]. Nantes, 2010.

REFERENCES

1. Melehin VB, Magdiev ASh. Methodological foundations for assessing the quality of construction products. *Bulletin of Eurasian Science*. 2014;4(23):114. (In Russ) EDN: TCFNOB
2. Spiridonov ES, Dukhovny GS, Logvinenko AA, et al. Scientific approaches to assessing the quality of products for the construction of transport facilities. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2009;2:113–116. (In Russ.) EDN: KWCYKL
3. Makhutov NA, Reznikov DO. Comprehensive analysis of the strength and safety of potentially hazardous facilities subject to uncertainties. *Dependability*. 2020;20(1): 47–56. (In Russ.) doi: 10.21683/1729-2646-2020-20-1-47-56 EDN: BZBQMC
4. Kartopoltsev VM, Kartopoltsev AV, Alekseev AA. Towards reliability of load-bearing beams of bridges (Tomsk). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture*. 2023;25(6):183–195. (In Russ.) doi: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-183-195 EDN: XACQYX
5. Kosheleva ZhV, Mikhalevich NV. Calculation of the reliability of a reinforced concrete span bridge during operation. *Effective building structures: theory and practice*. 2021:71–75. (In Russ.)
6. Akhmedov ShB, Almenov H, Shozhalilov ShSh, et al. Assessment of the service life of superstructure structures when predicting the durability of reinforced concrete bridges. *Scientific Journal of Transport Vehicles and Roads*. 2021;1(4):6–8. (In Russ.)
7. Morozova LN, Parkhomenko VV. Determination of the durability of reinforced concrete road bridges. *News of the Automobile and Road Institute*. 2022;1(40):41–45. (In Russ.) EDN: OVJDYN
8. Akhmedov RM, Makhmudov O. Methods of planning and management of bridge repairs. *Economy and Society*. 2021;11-1(90):774–788. (In Russ.) EDN: QVNNIG
9. Ogurtsov GL, Ermoshin NA, Biryukov OR. The algorithm of the simulation model implementation and the simulation results. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(73):104–113. (In Russ.). doi: 10.52170/1815-9265_2025_73_104

10. Li CQ, Ian Mackie R, Lawanwisut W. A risk-cost optimized maintenance strategy for corrosion-affected concrete structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2007;5(22):335–346. doi: 10.1111/j.1467-8667.2007.00490.x
11. Artyukhov AA. Analysis of the activities of the administration of the Leninsky district of the city of Yekaterinburg on the improvement of the territory. *GOSREG: State regulation of public relations*. 2022;2(40):120–126. (In Russ.) EDN: KXYXUX
12. Gulitskaya LV, Shimanskaya OS. Actual problems of operation of reinforced concrete slab bridge structures. In: *XI Forum of Universities of Engineering and Technology Profile of the Union State: collection of materials, Minsk, December 12-16, 2022 / Belarusian National Technical University*. Minsk: BNTU. 2023:108–110. (In Russ.) EDN: ENNCUY
13. Gulai AV, Zaitsev VM. Synthesis of a taxonomic scheme for identifying the states of complex systems. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2019;2:84–90. (In Russ.) doi: 10.14357/20718594190208 EDN: ZXFVCJ
14. Akhrorov ShAU, Ovchinnikov II. Increasing the durability of reinforced concrete bridge structures (primary and secondary protection). *Bulletin of Eurasian Science*. 2022.3(14):21. (In Russ.) EDN: CSWOIQ
15. Bastidas-Arteaga E, Schoefs F, Chateauneuf A, et al. Probabilistic evaluation of the sustainability of maintenance strategies for RC structures exposed to chloride ingress. *International Journal of Engineering Under Uncertainty: Hazards, Assessment and Mitigation*. 2010;1-2(2):61–74.
16. Bastidas-Arteaga E. *Contribution for sustainable management of reinforced concrete structures subject to chloride penetration* [dissertation] Nantes; 2010.

Сведения об авторах:

Огурцов Глеб Леонидович, ассистент;

eLibrary SPIN: 1150-8781; ORCID: 0000-0002-5183-7420;

E-mail: gлеб_1_ог@mail.ru

Ермошин Николай Алексеевич, д-р воен. наук, профессор;

eLibrary SPIN: 6694-8297; ORCID: 0000-0002-0367-5375;

E-mail: ermonata@mail.ru

Исмаилов Алексей Марленович, канд. техн. наук, доцент;

eLibrary SPIN: 1929-1225; ORCID: 0000-0001-9325-2335;

E-mail: ismailov-aleksei@mail.ru

Information about the authors:

Gleb L. Ogurtsov, assistant

eLibrary SPIN: 1150-8781; ORCID: 0000-0002-5183-7420;

E-mail: gлеб_1_ог@mail.ru

Nikolaj A. Ermoshin, Dr. Sci. (Military), professor;

eLibrary SPIN: 6694-8297; ORCID: 0000-0002-0367-5375;

E-mail: ermonata@mail.ru

Aleksei M. Ismailov, Cand. Sci. (Engineering), associate professor;

eLibrary SPIN: 1929-1225; ORCID: 0000-0001-9325-2335;

E-mail: ismailov-aleksei@mail.ru