

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ
И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Научная статья

УДК 624.21/.8

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/169-182>**Метод прогнозирования усилий
в железобетонных пролётных строениях мостовых сооружений
при их проектировании и эксплуатации****Глеб Леонидович Огурцов[✉], Николай Алексеевич Ермошин**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация,✉ ogurtsov_gl@spbstu.ru

Аннотация. Существующие методы и методики по оценке напряжённо-деформированного состояния пролётного строения основаны на моделировании воздействия нормативных нагрузок АК и НК. При этом не учитывается изменение фактического состава, интенсивности и весогабаритных характеристик транспортного потока на многолетнюю перспективу. Нестационарный, стохастический характер динамики весогабаритных и скоростных характеристик транспортного потока, неопределённость параметров состава и интенсивности движения, воздействие агрессивных факторов внешней среды на конструкционные материалы пролётных строений требуют совершенствования методов прогнозирования долговечности и безотказности их главных балок.

Целью исследования является разработка методологического подхода по оценке показателей долговечности и безотказности балок пролётных строений железобетонных мостовых сооружений в процессе эксплуатации. Предложенный методологический подход основан на применении математического аппарата строительной механики для расчёта напряжённо-деформированного состояния балок пролётного строения, имитационного моделирования их работы, математической теории надёжности и теории транспортных потоков.

Полученные функции плотности распределения времени наработки на отказ балок пролётного строения позволяют прогнозировать возникающие в них усилия, показатели их безотказности и долговечности, а также разрабатывать конструктивно-технологические решения по повышению надёжности работы при проектировании и принимать превентивные меры по предотвращению аварий во время эксплуатации мостовых сооружений.

Ключевые слова: транспортное строительство, безотказность, долговечность, пролётное строение, мостовое сооружение, подвижные нагрузки

Для цитирования: Огурцов Г.Л., Ермошин Н.А. Метод прогнозирования усилий в железобетонных пролётных строениях мостовых сооружений при их проектировании и эксплуатации // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 169–182.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRFIELDS, BRIDGES AND TRANSPORT TUNNELS

Original article

**The method for predicting forces in reinforced concrete superstructures
of bridge structures during their design and operation****Gleb L. Ogurtsov[✉], Nikolay A. Yermoshin**Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russian Federation,✉ ogurtsov_gl@spbstu.ru

© Огурцов Г.Л., Ермошин Н.А., 2025

Abstract. The existing methods and techniques for assessing the stress-strain state of the superstructure are based on modeling the effects of regulatory loads AK and NK. This does not take into account changes in the actual composition, intensity, and weight and size characteristics of the traffic flow over the long term. The unsteady, stochastic nature of the dynamics of the weight, size and speed characteristics of the traffic flow, the uncertainty of the parameters of the composition and intensity of traffic, the impact of aggressive environmental factors on the structural materials of superstructures require improved methods for predicting the durability and reliability of their main beams.

The purpose of the study is to develop a methodological approach to assess the durability and reliability of beams of superstructures of reinforced concrete bridge structures during operation. The proposed methodological approach is based on the application of mathematical apparatus of structural mechanics to calculate the stress-strain state of superstructure beams, simulation modeling of their operation, mathematical theory of reliability and theory of traffic flows.

The obtained functions of the time distribution density for the failure of superstructure beams make it possible to predict the forces that arise in them, their reliability and durability, as well as to develop design and technological solutions to improve the reliability of work during design and to take preventive measures to prevent accidents during the operation of bridge structures.

Keywords: transport construction, reliability, durability, superstructure, bridge structure, mobile loads

For citation: Ogurtsov G.L., Yermoshin N.A. The method for predicting forces in reinforced concrete superstructures of bridge structures during their design and operation. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 169–182. (In Russ.).

Введение

Состояние работоспособности балок пролётного строения мостового сооружения является определяющим фактором обеспечения его безотказности и безопасности [1]. Неработоспособное состояние или полный отказ балки пролётного строения может наступить в том случае, когда усилия, вызванные внешними нагрузками, превышают её несущую способность, которая снижается из-за износа. В целях повышения безопасности работы мостовых сооружений необходимы достоверные методы прогнозирования и оценки безотказности балок пролётных строений мостов.

Вероятность отказа балки увеличивается в зависимости от продолжительности эксплуатации, интенсивности и состава транспортного потока, а также воздействия агрессивных сред. Кроме этого, несущая способность балки пролётного строения зависит от стабильности и точности технологических процессов изготовления, качества конструкционных материалов. Стохастический и нестационарный характер параметров транспортного потока [2, 3] и внешних воздействий на балки пролётного строения приводит к тому, что возникающие в них усилия являются случайными величинами [4, 5]. В связи с этим вероятность отказа балки может быть установлена на основе следующих предположений.

Вероятность возникновения усилия $\tilde{M}_{i(t)}$, вызванного внешними нагрузками, и вероятность обеспечения несущей способности $\tilde{M}_{ult,i(t)}$ балки пролётного строения в момент времени t образуют группу независимых событий. Таким образом, вероятность отказа балки пролётного строения $P(\tilde{M}_{i(t)} > \tilde{M}_{ult,i(t)})$ в момент времени t вследствие превышения усилия над несущей способностью определяется по формуле (1):

$$P(\tilde{M}_{i(t)} > \tilde{M}_{ult,i(t)}) = P(\tilde{M}_{i(t)}) \cdot P(\tilde{M}_{ult,i(t)}), \quad \text{при } \tilde{M}_{i(t)} > \tilde{M}_{ult,i(t)}. \quad (1)$$

При проектировании и эксплуатации мостовых сооружений определение усилий, вызванных транспортными средствами, выполняется для нормативных нагрузок АК и НК [6–8]. В соответствии с требованиями СП 35.13330.2011 и ГОСТ 32960–2014 применение нагрузки АК и НК на всех стадиях жизненного цикла мостового сооружения не зависит от транспортно-эксплуатационных характеристик автомобильной дороги, длины пролётного строения и его конструктивных особенностей [9]. Вследствие этого невозможно установление взаимосвязи между величинами усилий, вызванных существующим транспортным потоком и нагрузками АК и НК. Таким образом, на основании ретроспективных и прогнозных данных об интенсив-

ности и составе транспортного потока невозможно прогнозировать величину усилий, создающихся в конструктивных элементах в течение срока службы пролётного строения от нагрузок АК и НК.

В исследованиях [10–12] отмечается ежегодное увеличение объёмов грузооборота на территории РФ, что, в свою очередь, способствует повышению уровня допустимой нагрузки на ось транспортных средств^{24,25}. Рост объёмов грузоперевозок и стоимости топлива приводит к нарушению требований по допустимой нагрузке [13]. В условиях развития экономики страны производится пересмотр требований по допустимым нагрузкам на ось. На основании анализа состава транспортного потока [14, 15] выявлена тенденция увеличения нагрузки на ось транспортных средств на 0,3% ежегодно.

Таким образом, в процессе эксплуатации возможно наступление события, когда все параметры материалов, технологии изготовления, воздействия нагрузок и агрессивных сред оказываются в пределах нормы, но на уровне допустимых «минимальных» в заданном нормативным документом интервале, а не средних (нормативных) значений. В таком случае может наступить преждевременный отказ балки, вероятность которого требуется определить. Не менее важным показателем безотказности в данном случае может быть время работы до отказа балки в конкретных условиях её работы с учётом роста усилия в конструктивных элементах пролётного строения. Естественно, это время является случайной величиной [16, 17]. Прогнозирование усилий должно выполняться на основе данных о реальных значениях весогабаритных характеристик транспортного потока, загруженности участка автомобильной дороги, состава и интенсивности движения транспортных средств, а также учитывать конструктивные особенности пролётного строения в течение расчётного срока службы. Поэтому важнейшей задачей является выявление закона распределения времени работы до отказа балки для поиска практических мероприятий по обеспечению требуемой безотказности.

Материалы и методы

Результирующее усилие в i -ом конструктивном элементе пролётного строения определяется по формуле (2):

$$\tilde{M}_i = \tilde{M}_{y,i} + \tilde{M}_{sw,i} + \tilde{M}_{p,i}, \quad (2)$$

где $\tilde{M}_{y,i}$ – случайная величина усилия, вызванного транспортными средствами, кНм;

$\tilde{M}_{sw,i}$ – случайная величина усилия от собственного веса, кНм;

$\tilde{M}_{p,i}$ – случайная величина усилия от веса мостового полотна, кНм.

Величина усилий, вызванных транспортными средствами, может быть рассчитана исходя из их расположения на пролётном строении, весогабаритных параметров, интенсивности и состава движения [18]. При этом данные характеристики имеют стохастический характер, законы распределения которых необходимо установить [17, 19]. Общая масса транспортного средства зависит от характеристик, устанавливаемых заводом-изготовителем, которые включают массу автомобиля и массу перевозимого груза при соблюдении требований^{1,2}. Возможно предположить, что масса транспортного средства подчиняется нормальному закону распределения, превышение которой от среднего значения допускается не более чем на 10%. Распределение массы осуществляется в соответствии с расчётными схемами [14] и равномерно для колёс, расположенных на одной оси транспортного средства. Увеличение массы транспортного средства на протяжении срока службы пролётного строения предлагается определять по формуле (3):

$$P_{j(t)} = P_{j,0} \left(1 + \frac{\beta}{100} \right)^{t-1}, \quad (3)$$

²⁴ Постановление Правительства России от 01 декабря 2023 г. № 2060 «Об утверждении Правил движения тяжеловесного и (или) крупногабаритного транспортного средства».

²⁵ Федеральный закон «Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 08.11.2007 № 257-ФЗ.

где $P_{j,0}$ – исходная масса транспортного средства, т;
 β – процент ежегодного увеличения массы, %;
 t – время эксплуатации пролётного строения, года.

Для учёта конструктивных особенностей и совместной работы балок пролётного строения вычисление усилий предлагается проводить по поверхностям влияния φ_i . Поверхность влияния представляет собой функцию изменения возникающего усилия в определённом сечении i -ого конструктивного элемента в зависимости от координаты приложения нагрузки. Выявление поверхности влияния для i -ого конструктивного элемента проводится методом статического моделирования для сечения, имеющего максимальные усилия. Тогда усилия $\tilde{M}_{y,i}$, создающиеся в i -ой балке пролётного строения от r -ого колеса j -ой подвижной нагрузки, вычисляются в зависимости от его точки приложения в заданной системе координат в продольном X_{rj} и поперечном Y_{rj} направлениях (рис. 1).

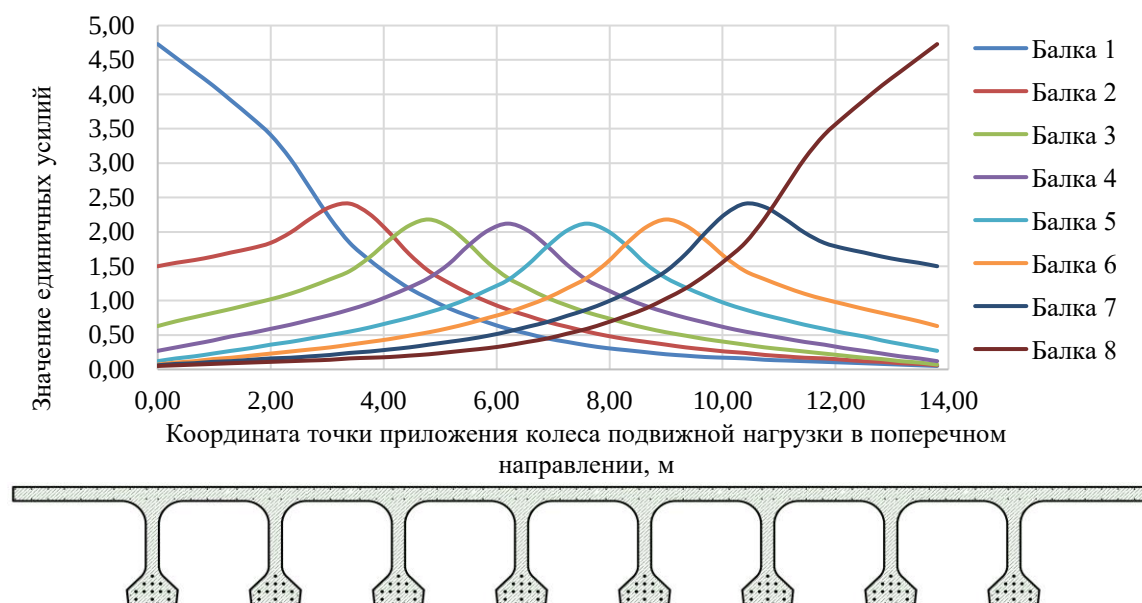


Рис. 1. Линии влияния для определения изгибающего момента $\tilde{M}_{yi}$ в зависимости от расположения транспортного средства на пролётном строении
 Fig. 1. Influence lines for determining the bending moment $\tilde{M}_{yi}$ depending on the location of the vehicle on the superstructure

Усилие $\tilde{M}_{y,i}$, возникающие в i -ой балке пролётного строения от k -ого количества расчётных автомобилей, расположенных на пролётном строении, определяется по формуле (4):

$$\tilde{M}_{y,i} = \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^d [\tilde{P}_{rj} \cdot \varphi_i(X_{rj}, Y_{rj})], \quad (4)$$

где $\tilde{P}_{rj}$ – случайная величина нагрузки на r -ое колесо, кН, определяемая как половина нагрузки от d -ой оси j -ого расчётного автомобиля.

Координаты приложения колеса устанавливаются из расчётных схем транспортных средств: длины, ширины, расстояния между осями и расположением в полосе движения. По длине пролётного строения автомобили располагаются на дистанции, достаточной для применения торможения, то есть на расстоянии, равном полному остановочному пути [20–21]. Максимальные усилия в конструктивных элементах пролётного строения достигаются при минимальных расстояниях между автомобилями, что соответствует образованию затора. В таком случае расстояние между расчётными автомобилями принимается равным 1,0 метру. При проектировании автомобильной дороги её пропускная способность определяется с учётом прироста интенсивности движения и дальнейшего развития транспортной сети на последний год эксплуатации. Таким образом, в результате увеличения интенсивности движения происходит снижение коэффициента обеспеченности пропускной способности автомобильной дороги в

течение эксплуатации, что приводит к образованию заторов. До этого момента расстояние между расчётными автомобилями можно принять равным длине остановочного пути, величина которого зависит от скорости движения и определяется по формуле (5) [20–21]:

$$S_0 = (t_1 + t_2 + 0,5 \cdot t_3) \cdot \frac{V_a}{3,6} + \frac{V_a^2}{25,92 \cdot \alpha}, \quad (5)$$

где t_1 – время реакции водителя, сек.;
 t_2 – время запаздывания срабатывания тормозного привода, сек.;
 t_3 – время нарастания замедления при торможении, сек.;
 α – замедление при экстренном торможении, м/сек.²;
 V_a – скорость движения на участке автомобильной дороги, км/ч, определяемая по формуле (6):

$$V_a = V_{max} \ln \left(\frac{1}{1 - k_{int(t)}} \right), \quad (6)$$

где V_{max} – максимально допустимая скорость движения автомобилей, км/ч;
 $k_{int(t)}$ – коэффициент обеспеченности пропускной способности автомобильной дороги [23] в момент времени t , д. ед., который устанавливается на основании ретроспективного анализа развития улично-дорожной сети.

Значение максимальных усилий также зависит от расположения автомобилей по длине пролётного строения [24]. Такие усилия возникают при расположении автомобилей в центре пролёта. Для моделирования транспортных потоков на мостовом сооружении рационально использовать модель следования за лидером (рис. 2), где координата в продольном направлении лидера потока n_N в полосе N определяется по неблагоприятному расположению, а появление лидера в данной точке подчиняется закону распределения Бернулли.

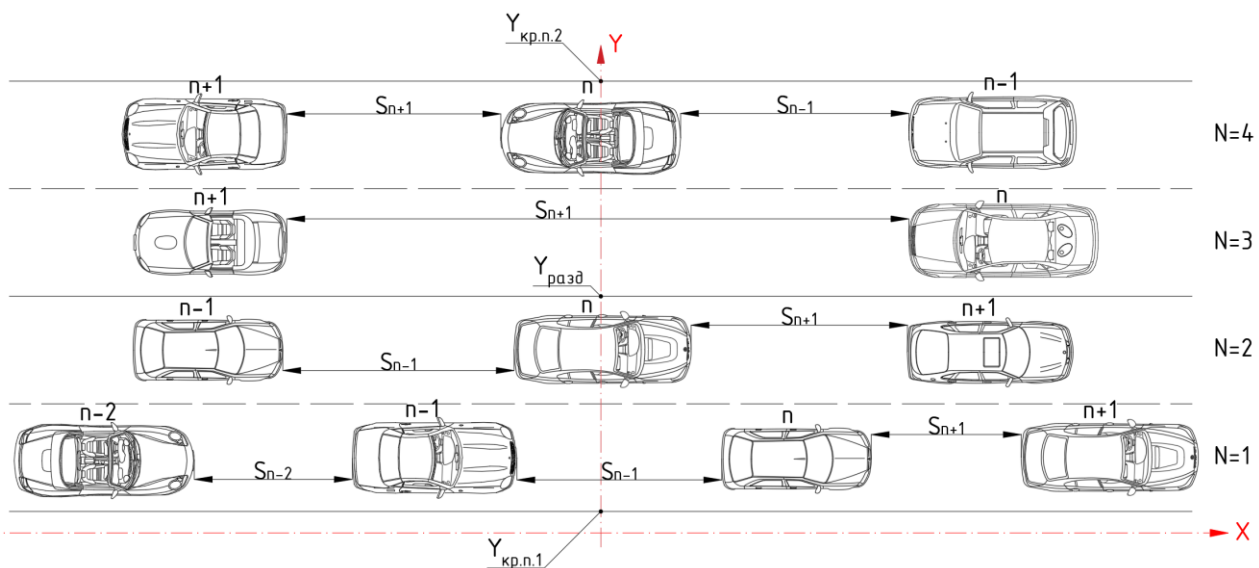


Рис. 2. Графическая модель транспортного потока на мостовом сооружении

Fig. 2. Graphical model of the traffic flow on the bridge structure

При отсутствии автомобиля в точке возникновения максимальных усилий X_{max} считается, что автомобиль располагается на интервале, равном суммарной длине остановочного пути и средней длине автомобиля. Координата в продольном направлении X_j лидера потока определяется по условию (7):

$$X_j = \begin{cases} X_{max} & \text{при } P_n = 1 \\ X_{max} - l_{cp} - S_0 \leq X_j \leq X_{max} + l_{cp} + S_0 & \text{при } P_n = 0 \end{cases} \quad (7)$$

где P_n – вероятность появления лидера потока в центре пролёта.

Координаты других расчётных автомобилей в полосе движения определяются относительно координаты лидера так, чтобы расстояние между ними было достаточным для осуществления торможения. Расположение транспортного средства в поперечном профиле мостового сооружения зависит от схемы движения, реализуемой применением технических средств организации дорожного движения. Анализ следования автомобилей по полосе [25] показал, что при следовании автомобиля по полосе водителями ненамеренно осуществляется смещение в поперечном направлении относительно осевой линии на 0,5 метра. Величину координаты в поперечном направлении Y_j расчётного автомобиля в полосе допустимо принять как случайную нормально распределённую, приняв за математическое ожидание геометрический центр полосы, а за стандартное отклонение – треть от смещения, равного 0,5 метра.

Для моделирования типа транспортного средства в составе потока необходимо установить функцию распределения вероятности его появления. Вероятность появления j -ого транспортного средства с интенсивностью N_j при известной суммарной интенсивности потока N_{sum} соответствует дискретному равномерному закону распределения и определяется по формуле (8):

$$P_j = \frac{N_j}{N_{sum}}. \quad (8)$$

Величина интенсивности движения изменяется в течение эксплуатации, что приводит к изменению вероятности появления. Интенсивность движения типа транспортного средства на момент времени t вычисляется по формуле (9):

$$N_{j(t)} = N_{j,0} \left(1 + \frac{q}{100} \right)^{t-1}, \quad (9)$$

где $N_{j,0}$ – исходная интенсивность движения, авт./сут;
 q – процент ежегодного прироста интенсивности, %.

Усилия, вызванные нагрузками от собственного веса конструктивного элемента и мостового полотна, вычисляются с помощью приведения равномерно распределённой нагрузки по длине элемента к узловым. Полученные результирующие узловые нагрузки формируют вектор внешних сил, что позволяет проводить вычисление усилий при использовании поверхности влияния по координатам узлов X_u и Y_u по формуле (10) – для вычисления усилий от собственного веса конструктивного элемента и формуле (11) – для собственного веса мостового полотна:

$$\tilde{M}_{sw,i} = \sum_{u=1}^s \sum_{e=1}^g 0,5 \cdot \tilde{\gamma}_e \cdot l_e \cdot \varphi_i(X_u, Y_u), \quad (10)$$

$$\tilde{M}_{p,i} = \sum_{u=1}^s \sum_{e=1}^g 0,5 \cdot \tilde{\gamma}_p \cdot l_e \cdot b_e \cdot \varphi_i(X_u, Y_u), \quad (11)$$

где $\tilde{\gamma}_e$ – случайная величина удельного веса e -ого конструктивного элемента (балки), представленная в виде равномерно распределённой нагрузки по его длине, кН/м;
 l_e и b_e – длина и грузовая ширина конструктивного элемента, м;
 $\tilde{\gamma}_p$ – удельный вес мостового полотна, представленный в виде равномерно распределённой нагрузки по длине конечного элемента, кН/м, величина которого определяется по формуле (12):

$$\tilde{\gamma}_p = \sum_{m=1}^f \tilde{\gamma}_m \cdot \tilde{h}_m, \quad (12)$$

где $\tilde{\gamma}_m$ и $\tilde{h}_m$ – случайные величины собственного веса, кН/м³, и высота m -ого конструктивного слоя, м.

Величины, характеризующие собственный вес конструктивных элементов и слоёв мостового полотна, а также их высоты, возможно принять подчинёнными нормальному закону распределения с допусками 5% по весу и 15% по высоте слоя в соответствии с СП 35.13330.2011 и ГОСТ Р 59120-2021 соответственно.

На основе выявленных математических зависимостей представляется возможным определить усилия, возникающие в конструктивном элементе в момент времени t . Установление аналитической функции закона распределения усилий проводилось с помощью имитационной модели, блок-схема которой представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Блок-схема имитационной модели работы главной балки пролётного строения

Fig. 3. Block diagram of the simulation model of the main beam of the superstructure

Алгоритм моделирования заключается в выполнении следующих процедур. В «Блок 1» вводятся значения входных параметров транспортно-эксплуатационных характеристик автомобильной дороги, а также интервалы их варьирования. Для данных значений вычисляются основные характеристики распределений, такие как математическое ожидание M и дисперсия D , на основании которых определяются вид функции закона распределения и параметры формы. В «Блоке 2» методом обратных функций выполняется имитация значений входных параметров по выявленным законам распределения. Работа «Блока 3» заключается в вычислении значения усилия в конструктивном элементе (балке) пролётного строения по выявленным математическим зависимостям для различных комбинаций. В «Блоке 4» моделируются усилия в конструктивных элементах для каждого дискретного приращения времени. «Блок 5» предназначен для определения требуемого количества прогонов модели K на основании статистических характеристик данных для каждого момента времени до обеспечения заданного уровня доверительной вероятности. «Блок 6» интерпретирует результаты имитационного моделирования для каждого момента времени в целях получения аналитической функции закона распределения усилий в конструктивном элементе (балке).

Результаты исследования

Реализация результатов исследования выполнялась для разрезной системы пролётного строения, состоящей из 8 железобетонных балок. Собственный вес балки пролётного строения имеет математическое ожидание, равное 16,75 кН/м. Входные параметры, используемые для моделирования усилия от собственного веса мостового полотна, представлены в таблице 1.

Расчётные схемы транспортных средств приняты в соответствии с [20]. Интенсивности их движения и схемы распределения массы по осям представлены в таблице 2.

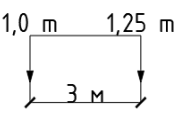
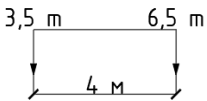
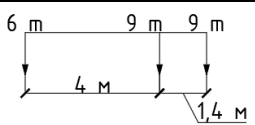
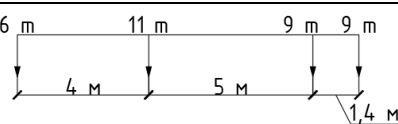
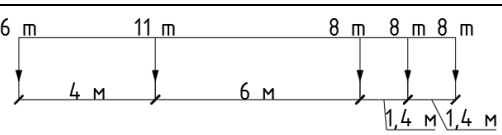
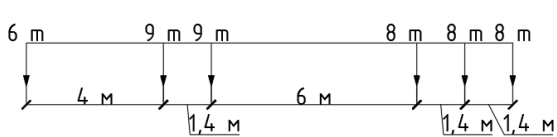
Таблица 1 / Table 1

Конструкция мостового полотна
Bridge deck structured system

№ п/п	Наименование слоя	Удельный вес, кН/м ³	Высота, см
1	Асфальтобетонное покрытие 1	27	5,0
2	Асфальтобетонное покрытие 2	27	5,0
3	Защитный слой	25	4,0
4	Гидроизоляция	11	0,5
5	Выравнивающий слой	25	3,0

Таблица 2 / Table 2

Состав и интенсивность движения транспортных средств
Composition and intensity of traffic of vehicles

Тип ТС	Наименование схемы	Расчётная схема условного автомобиля	Интенсивность движения, авт./сут.
1	Легковой автомобиль		3000
2	Двухосный автомобиль		500
3	Трёхосный автомобиль		300
4	Четырёхосный автомобиль		200
5	Пятиосный автомобиль		50
6	Шестиосный автомобиль		25

Процент ежегодного увеличения массы для всех типов транспортных средств принят равным 0,3%. Прирост интенсивности движения для 1-го типа транспортных средств принят равным 3,0%, для 2-го и 3-го – 4,0%, для 4-го, 5-го и 6-го – 5,0%.

При проектировании принято, что расчётная максимальная скорость движения автомобилей составляет 110 км/ч. На основании анализа развития транспортной сети прогнозируется, что коэффициент обеспеченности пропускной способности в течение срока эксплуатации мостового сооружения (рис. 4) определяется по формуле (13):

$$k_{int(t)} = e^{-\lambda \cdot t}, \quad (13)$$

где λ – интенсивность изменения пропускной способности, д. ед., равное 0,04.

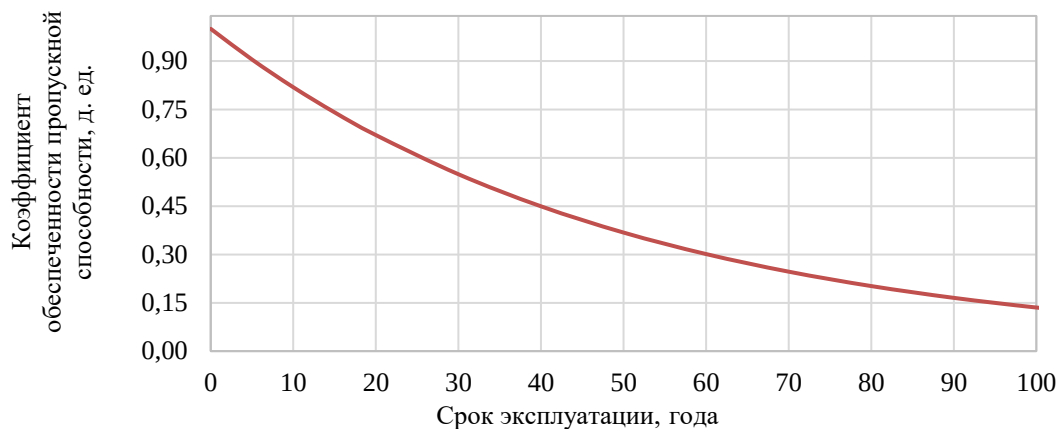


Рис. 4. Коэффициент обеспеченности пропускной способности в течение срока эксплуатации мостового сооружения

Fig. 4. The coefficient of capacity availability during the life of the bridge structure

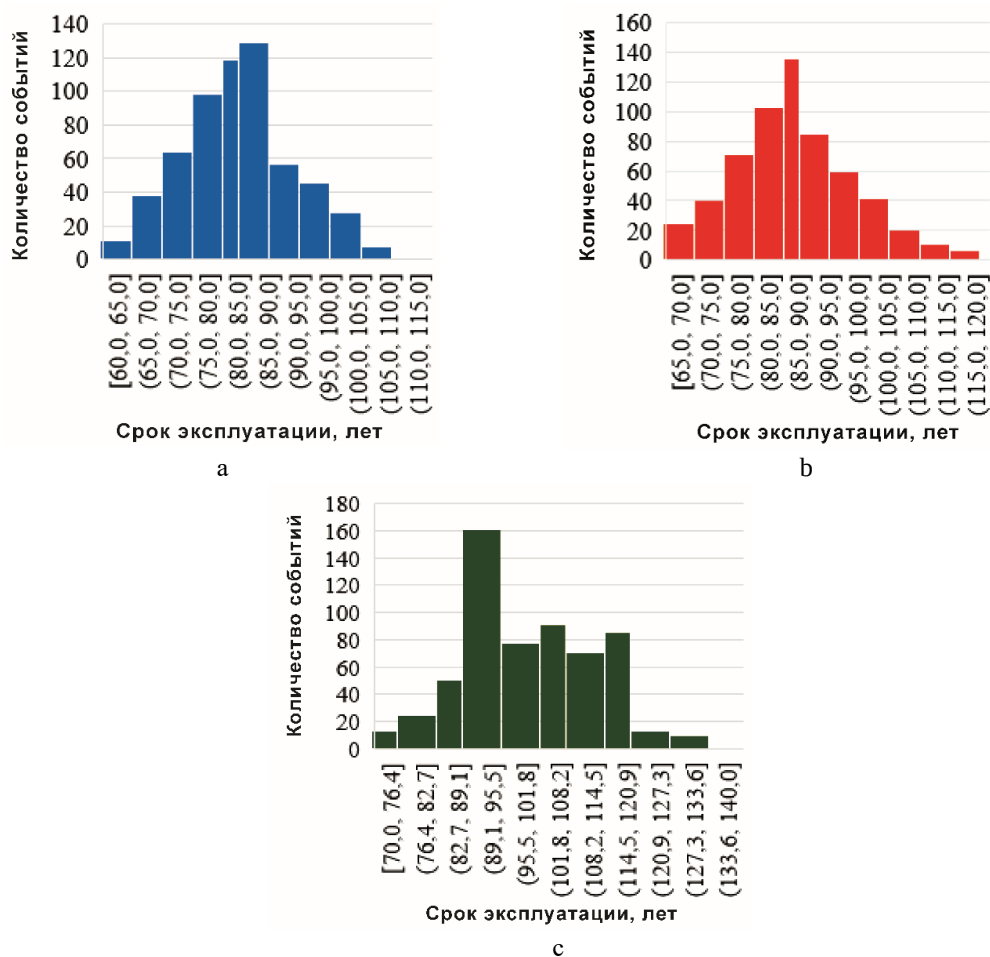


Рис. 5. Гистограмма частот времени наработки на отказ:

а) по прогибу (среднее время $\bar{T} = 85,52$ года $\sigma_T = 10,39$);

б) по ширине раскрытия трещин (среднее время $\bar{T} = 89,30$ года $\sigma_T = 11,02$);

в) по несущей способности (среднее время $\bar{T} = 100,39$ года $\sigma_T = 12,62$)

Fig. 5. Histogram of failure time frequencies: а) by deflection (average time $\bar{T} = 85,52$ years $\sigma_T = 10,39$); б) by crack opening width (average time $\bar{T} = 89,30$ years $\sigma_T = 11,02$); в) by bearing capacity (average time $\bar{T} = 100,39$ years $\sigma_T = 12,62$)

Анализ результатов имитационного моделирования позволяет сделать вывод, что усилия в балке пролётного строения подчиняется нормальному закону распределения для любого

момента времени t . На стадии проектирования установлено, что при достижении расчётного значения усилия, равного 6473,51 кНм, наступает отказ балки по прогибу, при значении 6683,01 кНм – по ширине раскрытия трещин, а при значении 7154,55 кНм – по несущей способности. На основании проведённого имитационного моделирования возможно определить вероятность и время наступления отказа балки пролётного строения (рис. 5).

Результаты имитационного моделирования подтверждают гипотезу о том, что время наработки на отказ подчиняется нормальному закону распределения. Математические ожидания времени наработки на отказ по прогибу составляет 85 лет 190 дней; ширине раскрытия трещин – 89 лет 110 дней и несущей способности – 100 лет 142 дня. Отказы происходят вследствие достижения значения коэффициента обеспеченности пропускной способности автомобильной дороги, равного 0,09.

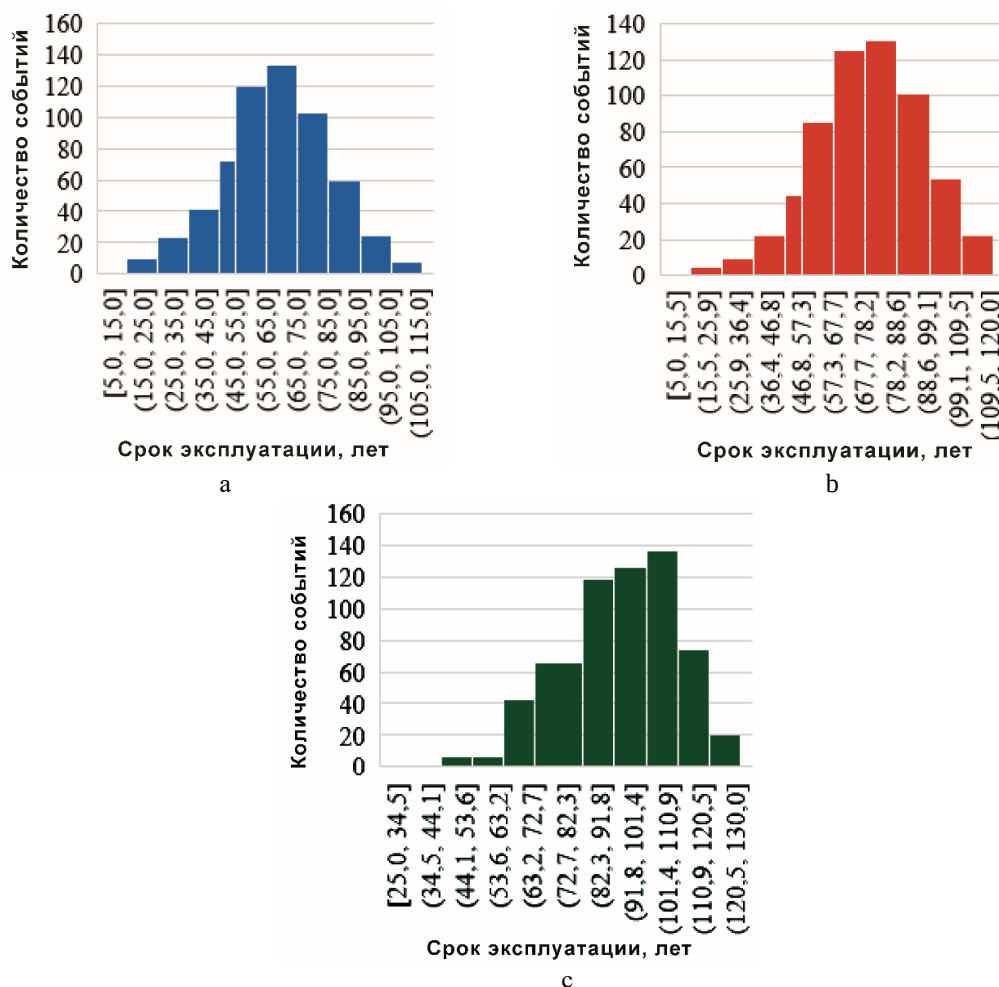


Рис. 6. Гистограмма частот времени наработки на отказ:

а) по прогибу (среднее время $\bar{T} = 69,24$ года $\sigma_T = 18,49$);

б) по ширине раскрытия трещин (среднее время $\bar{T} = 76,76$ года $\sigma_T = 18,57$);

в) по несущей способности (среднее время $\bar{T} = 95,30$ года $\sigma_T = 17,03$)

Fig. 6. Histogram of failure time frequencies:

a) by deflection (average time $\bar{T} = 69,24$ years $\sigma_T = 18,49$);

b) by crack opening width (average time $\bar{T} = 76,76$ years $\sigma_T = 18,57$);

c) by bearing capacity (average time $\bar{T} = 95,30$ years $\sigma_T = 17,03$)

В случае когда прирост интенсивности движения становится равным 2%, математические ожидания времени наработки на отказ по прогибу, ширине раскрытия трещин и несущей способности принимают значения 123 года 186 дней, 127 лет 9 дней и 135 лет 91 день соответственно. Следовательно, математические ожидания времени наработки на отказ зависят от ко-

эффициента обеспеченности пропускной способности автомобильной дороги и допустимой нагрузки на ось автомобиля. Повышение долговечности и безотказности пролётного строения представляется возможным при выполнении мероприятий по ограничению весогабаритных параметров транспортных средств и повышению пропускной способности. Данные мероприятия следует вводить на 60-м году при приросте интенсивности движения 4%. При двухпроцентном приросте интенсивности проведение данных мероприятий не требуется.

Представляет особый интерес выявление времени наработки на отказ для случая не обеспечения пропускной способности, когда коэффициент обеспеченности пропускной способности стремится к нулю. На основании имитационного моделирования получены гистограммы частот времени наработки на отказ (рис. 6).

При образовании заторов математические ожидания времени наработки на отказ равны: 69 лет 88 дней – по прогибу, 76 лет 278 дней – по ширине раскрытия трещин и 95 лет 110 дней – по несущей способности. В данном случае необходимо применять мероприятия по ограничению весогабаритных параметров транспортных средств на 25-м году эксплуатации. Таким образом, для обеспечения требуемого уровня безотказности и долговечности пролётного строения существует необходимость в проведении мероприятий, способствующих повышению коэффициента обеспеченности пропускной способности в течение срока службы.

Заключение

Предложенный метод позволяет прогнозировать безотказность и долговечность конструктивных элементов пролётного строения для различных уровней обеспечения пропускной способности участка автомобильной дороги и определять требуемые мероприятия по их повышению при проектировании и эксплуатации.

Апробация метода и входящей в его состав имитационной модели выполнена для балки пролётного строения разрезной системы. Установлено, что для обеспечения требуемого уровня безотказности и долговечности пролётного строения необходимо предпринимать следующие мероприятия: обеспечение пропускной способности – отсутствие образования заторов на мостовом сооружении и снижение коэффициента обеспеченности пропускной способности до 0,09; повышение максимально допустимой скорости движения на участке автомобильной дороги; введение ограничений по весогабаритным характеристикам транспортных средств при невозможности обеспечить пропускную способность.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Г.Л. Огурцов – разработка имитационной и математической моделей, вывод формул; Н.А. Ермошин – постановка задачи, научное руководство работой.

G.L. Ogurtsov – development of an imitation and mathematical models, derivation of formulas; N.A. Yermoshin – problem statement, scientific guidance of the work. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дмитриев А.А. Причины разрушения мостовых сооружений // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства. 2021. С. 117–118.
2. Саламахин П.М. Обоснование нормативных временных вертикальных нагрузок на автодорожные мостовые сооружения и автомобильные дороги РФ // Наука и техника в дорожной отрасли. 2020. № 1. С. 36–40.
3. Смоляго Г.А., Луценко А.Н., Дрокин С.В. К оценке живучести каркасных конструктивных систем из монолитного железобетона с учётом дефектов изготовления и монтажа // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. 2010. № 2. С. 80–83.

4. Саламахин П.М. Концепция формирования нормативных и расчётных вертикальных временных нагрузок на автодорожные и городские мостовые сооружения Российской Федерации // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2015. № 3. С. 69–73.
5. Скворцов О.В. Анализ действующих норм // Автомобильные дороги. 2015. № 5. С. 54–57.
6. Нигаматова О.И., Смердов Д.Н. К вопросу оценки технического состояния автодорожных мостовых сооружений // Инновационный транспорт. 2013. № 4. С. 31–36.
7. Белый А.А., Карапетов Э.С., Цыганкова Е.С. Эволюция транспортных нагрузок для расчёта железобетонных мостовых сооружений на примере Санкт-Петербурга // Транспортное строительство. 2017. № 12. С. 21–24.
8. Антоненко М.В., Иванкина О.П. Расчёт мостовых сооружений на действие подвижной нагрузки // Новые технологии в учебном процессе и производстве. 2020. С. 153–155.
9. Саламахин П.М. Проблемы, вызывающие необходимость замены нормативных временных нагрузок АК для автодорожных мостовых сооружений // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2010. № 33. С. 232–239.
10. Жежеря Е.А., Кирова И.В., Попова Т.Л. Анализ динамики российского рынка грузоперевозок (2004–2013 гг.) // Экономика и социум. 2015. № 1–3 (14). С. 93–98.
11. Амелин С.С. Анализ динамики российского рынка грузоперевозок (2000–2017 гг.) // Экономика и социум. 2018. № 10 (53). С. 124–129.
12. Лобанова Т.М., Пузанова Т.В. Тенденции и проблемы развития грузоперевозок в регионе // Вестник Белорусско-Российского университета. 2022. № 4 (77). С. 92–101.
13. Тропынина Н.Е., Куликова О.М., Аксенова В.К. Анализ рынка грузоперевозок в России // Журнал прикладных исследований. 2023. № 3. С. 115–123.
14. Васильев А.И. Деградационные процессы и остаточный ресурс долговечности мостовых элементов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2020. № 1 (23). С. 1.
15. Дуйшеев С.Д., Маткеримов Т.Ы., Атамкулов У.Т. Совершенствование организации пропуска крупногабаритных и тяжеловесных транспортных средств по автомобильным дорогам // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2013. № 29. С. 116.
16. Ventura R., Barabino B., Maternini G. Prediction of the severity of exceeding design traffic loads on highway bridges // Heliyon. 2024. Т. 10. № 1. С. 23374.
17. Yu Y., Cai C. S. Prediction of extreme traffic load effects of bridges using Bayesian method and application to bridge condition assessment // Journal of Bridge Engineering. 2019. Т. 24. № 3. С. 04019003.
18. Полярус О.В., Барчан В.В. Модель транспортного потока по мосту как основа определения допустимой нагрузки на мост для выполнения требований охраны труда // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2012. № 59. С. 214–218.
19. Dan D. et al. A digital twin model of traffic flow load for full bridge deck geared to analysis of bridge mechanical effects under statistical steady state // Structures. Elsevier, 2025. Т. 73. С. 108299.
20. Мохнев В.А. Теоретический анализ вероятностных характеристик длины остановочного пути автомобиля // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2019. № 1. С. 41–46.
21. Сидоров Б.А., Карев Б.Н. Влияние точности оценки величин параметров экстренного торможения автомобиля на выводы экспертов-автотехников // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. С. 97–101.
22. Подопригора Н.В. Совершенствование методики определения тормозных параметров при реконструкциях и экспертизах ДТП // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 6. С. 143–150.
23. Ермошин Н.А., Букатов Д.С. Имитационная модель определения эксплуатационных показателей военно-автомобильных дорог // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения: военно-научный журнал. 2019. № 3. С. 104–109.
24. Wang X. et al. Probabilistic modeling of congested traffic scenarios on long-span bridges // Applied Sciences. 2024. Т. 14. № 20. С. 9525.
25. Страхова Д.А., Грешников А.А. Допустимые параметры ширины полос движения на автомагистралях в Российской Федерации // Дороги и мосты. 2018. № 2. С. 64–74.

REFERENCES

1. Dmitriev A.A. The causes of the destruction of bridge structures. *Traditions, Modern Problems and Prospects of Construction Development*, 2021, pp. 117–118.

2. Salamakhin P.M. Substantiation of normative temporary vertical loads on highway bridge structures and highways of the Russian Federation. *Science and Technology in the Road Industry*, 2020, no. 1, pp. 36–40.
3. Smolyago G.A., Lutsenko A.N., Drokin S.V. Assessment of the survivability of frame structural systems made of monolithic reinforced concrete, taking into account manufacturing and installation defects. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2010, no. 2, pp. 80–83.
4. Salamakhin P.M. The concept of formation of normative and calculated vertical temporary loads on road and urban bridge structures of the Russian Federation. *Bulletin of the Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI)*, 2015, no. 3, pp. 69–73.
5. Skvortsov O.V. Analysis of current regulations. *Highways*, 2015, no. 5, pp. 54–57.
6. Nigmatova O.I., Smerdov D.N. On the issue of assessing the technical condition of road bridge structures. *Innovative Transport*, 2013, no. 4, pp. 31–36.
7. Bely A.A., Karapetov E.S., Tsygankova E.S. Evolution of transport loads for calculation of reinforced concrete bridge structures on the example of St. Petersburg. *Transport Construction*, 2017, no. 12, pp. 21–24.
8. Antonenko M.V., Ivankina O.P. Calculation of bridge structures for the effect of a moving load. *New Technologies in the Educational Process and Production*, 2020, pp. 153–155.
9. Salamakhin P.M. Problems causing the need to replace the standard temporary loads of AK for road bridge structures. *Science and Progress of Transport. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport*, 2010, no. 33, pp. 232–239.
10. Zhezherya E.A., Kirova I.V., Popova T.L. Analysis of the dynamics of the Russian cargo transportation market (2004–2013). *Economics and Society*, 2015, no. 1–3 (14), pp. 93–98.
11. Amelin S.S. Analysis of the dynamics of the Russian cargo transportation market (2000–2017). *Economics and Society*, 2018, no. 10 (53), pp. 124–129.
12. Lobanova T.M., Puzanova T.V. Trends and problems of cargo transportation development in the region. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2022, no. 4 (77), pp. 92–101.
13. Tropynina N.E., Kulikova O.M., Aksenova V.K. Cargo transportation market analysis in Russia. *Journal of Applied Research*, 2023, no. 3, pp. 115–123.
14. Vasiliev A.I. Degradation processes and residual durability of bridge elements. *Car. Road. Infrastructure*, 2020, no. 1 (23), p. 1.
15. Duishoev S.D., Matkerimov T.Y., Atamkulov U.T. Improving the organization of passage of large and heavy vehicles on highways. *Izvestiya KSTU named after I. Razzakov*, 2013, no. 29, p. 116.
16. Ventura R., Barabino B., Maternini G. Prediction of the severity of exceeding design traffic loads on highway bridges. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 1, p. 23374.
17. Yu Y., Cai C.S. Prediction of extreme traffic load effects of bridges using Bayesian method and application to bridge condition assessment. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, vol. 24, no. 3, p. 04019003.
18. Polyarus O.V., Barchan V.V. The model of traffic flow on the bridge as the basis for determining the permissible load on the bridge to meet labor protection requirements. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Road University*, 2012, no. 59, pp. 214–218.
19. Dan D. et al. A digital twin model of traffic flow load for full bridge deck geared to analysis of bridge mechanical effects under statistical steady state. *Structures*. Elsevier, 2025, vol. 73, p. 108299.
20. Mokhnev V.A. Theoretical analysis of probabilistic characteristics of the length of the stopping distance of the car. *Technical Regulation in Transport Construction*, 2019, no. 1, pp. 41–46.
21. Sidorov B.A., Karev B.N. The influence of the accuracy of estimating the values of the emergency braking parameters of a car on the conclusions of automotive experts. *Modern Problems of Science and Education*, 2012, no. 5, pp. 97–101.
22. Podoprighora N.V. Improvement of the methodology for determining braking parameters during reconstructions and examinations of accidents. *Bulletin of Civil Engineers*, 2012, no. 6, pp. 143–150.
23. Ermoshin N.A., Bukatov D.S. Simulation model for determining the operational performance of military highways. *Scientific Bulletin of the Volsky Military Institute of Material Support: Military Scientific Journal*, 2019, no. 3, pp. 104–109.
24. Wang X. et al. Probabilistic modeling of congested traffic scenarios on long-span bridges. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 20, p. 9525.
25. Strakhova D.A., Greshnikov A.A. Permissible parameters of lane widths on motorways in the Russian Federation. *Roads and Bridges*, 2018, no. 2, pp. 64–74.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Огурцов Глеб Леонидович – аспирант, ассистент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Российская Федерация),

✉ ogurtsov_gl@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5183-7420>

Gleb L. Ogurtsov, Postgraduate Student, Assistant at the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation).

Ермошин Николай Алексеевич – доктор военных наук, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Российская Федерация),

✉ ermoshin_na@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0367-5375>

Nikolay A. Yermoshin, Doctor of Military Sciences, Professor at the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 14.02.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 16.05.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.