

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 4 / 2024, Vol. 11, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/03SATS424.pdf>

DOI: 10.15862/03SATS424 (<https://doi.org/10.15862/03SATS424>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

УДК 624.21

Сопоставление проектных и фактических индексов надежности железобетонного автодорожного моста при воздействии нагрузки транспортного потока

Рудаков И.А., Козак Н.В.

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Козак Николай Викторович, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com

Аннотация. На сегодняшний день в практике российского проектирования мостовых сооружений используется полувероятностный подход к учету неопределенностей в воздействиях и свойствах материалов (в виде коэффициентов надежности). Этот подход удобен в использовании, но обладает рядом недостатков. Во-первых, использование постоянных коэффициентов не позволяет учесть фактические особенности состава движения на конкретной дороге. Во-вторых, проверки с использованием полувероятностного подхода дают только качественный ответ (например, удовлетворение конструкции условиям по первой группе предельных состояний) и не позволяют количественно оценить вероятность отказа конструкции. В рамках данного исследования авторами использованы методы полного вероятного подхода к определению показателя надежности конструкции (индекса β) применительно к разрезному ребристому железобетонному пролетному строению автодорожного моста. При этом были рассмотрены режимы нагружения пролетного строения как моделью проектных нагрузок (с учетом ее перевода в полную вероятную поставку), так и моделью нагрузки от фактического

транспортного потока, для определения которой были проанализированы данные с весовых пунктов на автомобильных дорогах России и построены распределения масс тяжелых транспортных средств. В качестве инструмента для проведения вероятного анализа был использован программный комплекс SOFiStiK со специальным модулем вероятностных расчетов RELY, позволяющим реализовать вычисления с использованием методов FORM и SORM (First-Order и Second-Order Reliability Method). По результатам сопоставления индексов надежности было отмечено, что для конкретного рассмотренного случая фактический индекс надежности на 13 % меньше проектного и почти что на 40 % меньше целевого индекса надежности, принятого по рекомендациям зарубежных норм. Разработанный в ходе исследования алгоритм может быть применен в дальнейшем для определения показателей надежности существующих эксплуатируемых сооружений.

Ключевые слова: мост; пролетное строение; железобетон; надежность; индекс надежности; проектные нагрузки; режим нагруженности; статический анализ; FORM; SORM

Comparison of design and actual reliability indices of a reinforced concrete road bridge under the influence of traffic flow loads

Igor A. Rudakov, Nikolai V. Kozak

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: Nikolai V. Kozak, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com

Abstract. Currently, the semiprobabilistic approach is employed in the practice of bridge design in Russia to account for uncertainties in loads and material properties through reliability coefficients. The semi-probabilistic approach is convenient to use, but it has several disadvantages. Firstly, the use of constant coefficients fails to consider the actual characteristics of traffic composition on specific roads. Secondly, assessments utilizing the semiprobabilistic approach provide only qualitative outcomes (for instance, confirming that a structure meets the conditions for the first group of limit states) and do not allow for a quantitative evaluation of the probability of structural failure. This study employs a full probabilistic approach to determine the reliability index (β) of a cross-sectional ribbed reinforced concrete span structure in a road bridge context. The loading conditions of the span structure were considered using both a model of design loads (taking into account its conversion to a full probabilistic supply) and a model of loads from actual traffic flow, for which data from weigh

stations on Russian highways were analyzed and distributions of heavy vehicle masses were constructed. The SOFiSTiK software suite was used as a tool for conducting probabilistic analysis, utilizing the special RELY module for probabilistic calculations, which allows for computations using FORM and SORM methods (First-Order and Second-Order Reliability Method). The results of comparing reliability indices indicated that, for the specific case examined, the actual reliability index is 13 % lower than the design index and nearly 40 % lower than the target reliability index adopted according to recommendations from foreign standards. The algorithm developed during this research can be further applied to determine the reliability indicators of existing operational structures.

Keywords: bridge; span structure; reinforced concrete; reliability; reliability index; design loads; loading conditions; static analysis; FORM; SORM

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Одной из важнейших характеристик мостовых сооружений на автомобильных дорогах является их надежность в течении всего срока службы. Последние исследования, посвященные систематизации и анализу причин разрушения мостовых сооружений [1–3] показывают, что существует тенденция к росту обрушений эксплуатируемых мостов вследствие их износа, что может свидетельствовать о наличии проблем с контролем их надежности, и, в целом, с управлением их надежностью.

Согласно ГОСТ 27751-2014¹, определение надежности строительных конструкций дается как способность сооружения или элемента конструкции соответствовать установленным требованиям в течении всего срока службы. Согласно ОДМ 218.6.030-2017² для железобетонных пролетных строений, расположенных в II–III климатических зонах, планируемый срок службы должен достигать 100 лет, а срок до первого капитального ремонта с восстановлением первоначальных свойств — 50 лет. Очевидно, что надежность должна обеспечиваться на протяжении всего срока эксплуатации с учетом изменения как свойств материалов конструкции, так и с учетом изменения (обычно — увеличения) величин воздействий. Помимо этого, стоит обратить внимание на фактический первоисточник стандарта EN 1990-2011³, где к вышеприведенному определению имеется важное дополнение: «Надежность обычно выражается в вероятностных терминах».

На сегодняшний день в практике российского проектирования мостовых сооружений используется полувероятностный подход к учету неопределенностей в воздействиях и свойствах материалов (метод коэффициентов надежности). Этот подход удобен в инженерном использовании, но обладает рядом недостатков. Во-первых, использование постоянных коэффициентов не позволяет учесть фактические особенности состава движения на конкретной дороге. Во-вторых, проверки с использованием полувероятностного подхода дают только качественный ответ (например, удовлетворение конструкции условиям по первой группе предельных состояний) и не позволяют количественно оценить вероятность отказа конструкции. Кроме того, возможности полувероятностного подхода ограничены в задачах оценки состояния фактических и уже эксплуатируемых конструкций, где характеристики материалов и

¹ ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований.

² ОДМ 218.6.030-2017 Рекомендации по установлению гарантийных сроков и сроков службы конструктивных элементов мостовых сооружений.

³ Национальный стандарт Российской Федерации НСР EN 1990-2011 «Еврокод 0: Основы проектирования сооружений» (1-я редакция). Издание официальное, Москва, 2011.

параметры воздействий могут быть получены натурно в виде распределений случайных величин.

Более универсальными представляются полные вероятные подходы учета неопределенностей, позволяющие непосредственно учитывать распределения случайных величин и получать численные показатели надежности, например, вероятности обрушения конструкции. Значительным недостатком таких подходов является трудоемкость их применения, вызванная, с одной стороны, необходимостью подбора корректных моделей распределения случайных величин, и, с другой стороны, значительными ресурсными затратами на проведение численных вычислений в вероятностной постановке. Особо стоит отметить сложности, связанные с моделированием фактических нагрузок от транспортного потока.

Цель текущего исследования заключается в разработке алгоритма определения показателей надежности разрезного железобетонного пролетного строения с возможностью учета фактических распределений случайных величин, а также апробация этого алгоритма на примере одного пролетного строения с вычислением показателей надежности как для проектных параметров, так и для фактических. Объектом исследования выступают железобетонные мосты с разрезными пролётными строениями, предметом исследования — параметры случайных величин, определяющих надёжность конструкции, а также показатели надежности конструкций пролетного строения. В ходе проведения исследования были использованы методы теории надежности строительных конструкций, метода расчета железобетонных конструкций мостовых сооружений, методы конечно-элементного анализа работы конструкций, ультразвуковой метод определения упругих свойств бетона, методы статистической обработки данных, а также численные методы оценки показателей надежности (SORM — Second Order Reliability Method).

Методы

Methods

Метод индекса надежности

Reliability index method

В качестве показателя надежности конструкций удобно использовать индекс надежности β (reliability index), определяемый как инверсия стандартного нормального распределения (формула 1)⁴:

⁴ JCSS Probabilistic Model Code //Joint Committee of Structural Safety [Electronic resource]. — 2001. —Mode of access: <http://www.jcss.ethz.ch>.

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f), \quad (1)$$

где $\Phi(p_f)$ — функция Лапласа, определяемая по формуле (2):

$$\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad (2)$$

p_f — плотность вероятности отказа.

При оценке надежности сооружения событие, называемое отказом F , определяется при помощи предельной функции $g(x)$. Разрушение происходит при значении $g(x) \leq 0$.⁵ Данная ситуация проиллюстрирована на рисунке 1. При рассмотрении вопроса надежности строительных конструкций данная функция может быть, к примеру, определена как $g(x) = R - S$, где R — предельная несущая способность, S — действующая нагрузка (рис. 2). Вероятность отказа определяется условием $p_f = p(R \leq S)$, то есть ситуацией, когда несущая способность конструкции ниже, чем действующие на нее нагрузки.

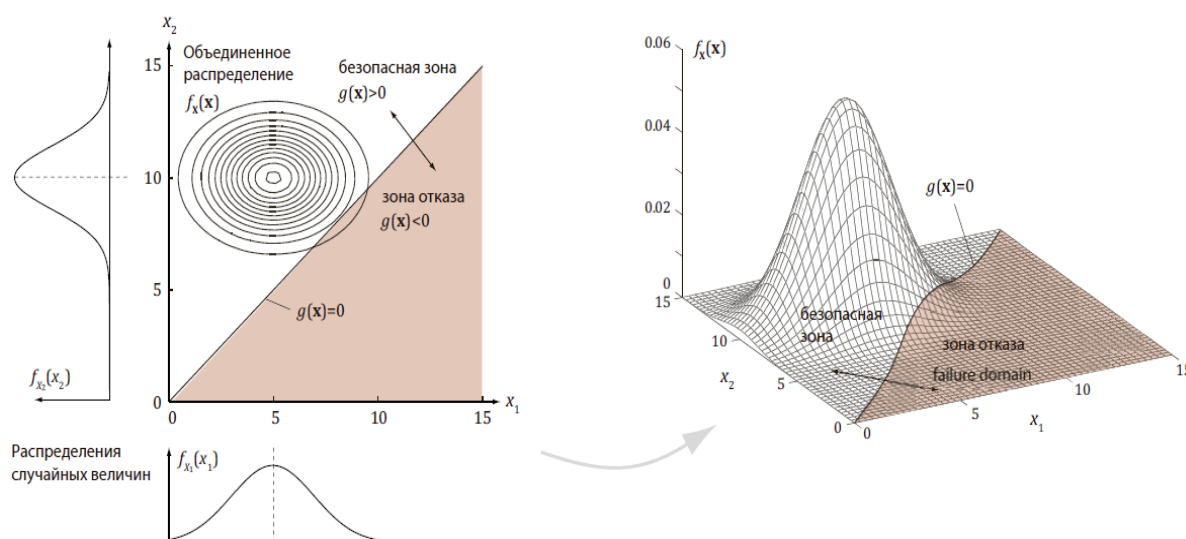


Рисунок 1. Иллюстрация общей проблемы надежности для случая двух случайных величин (источники Straub⁶ и SOFiSTiK Manual⁷ с комментариями авторов)

Figure 1. Illustration of the general reliability problem for the case of two random variables (sources Straub⁶ and SOFiSTiK Manual⁷ with comments by the authors)

ГОСТ Р ИСО 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности. (ISO 2394:1998, General principles on reliability for structures, IDT).

⁵ MCO Final Report 2006 F08a Guideline for the Assessment of Existing Structures / Dir. u. Prof. Dr. W. Rücker, Dipl.-Ing. F. Hille, Dipl.-Ing. R. Rohrmann, Federal Institute of Materials Research and Testing (BAM), Division VII.2 Buildings and Structures Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, Germany.

⁶ Daniel Straub. Lecture Notes in Structural Reliability. Tech. rep. TU München, 2012.

⁷ SOFiSTiK. RELY. Structural Reliability powered by Strurel. RELY Manual, Service Pack 2022-11 Build 218.

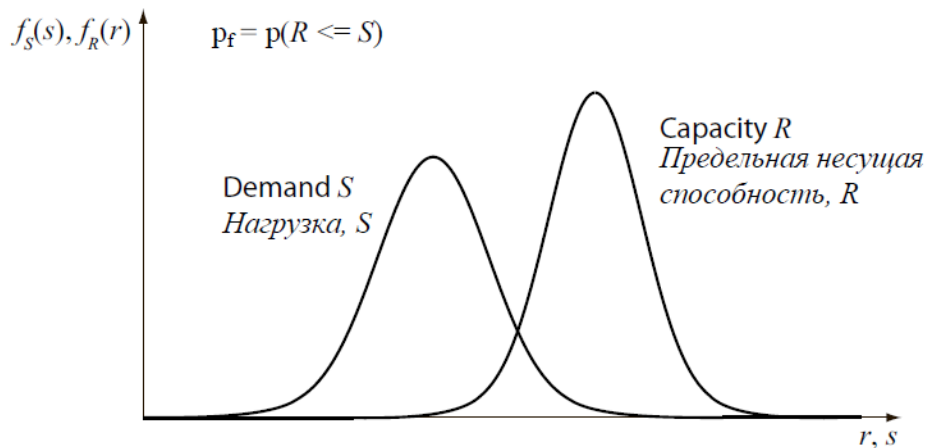


Рисунок 2. Основная проблема надежности конструкции. Вероятность отказа (источники Straub⁶ и SOFiSTiK Manual⁷ с комментариями авторов)

Figure 2. The Main Reliability Problem of the Structure: Probability of Failure (sources Straub⁶ and SOFiSTiK Manual⁷ with authors' comments)

Исходя из вышеприведённого можно определить индекс надежности конструкции в виде формулы (3) [4; 5]:

$$\beta = \frac{\Phi_M}{\sigma_\Phi} = \frac{(R-S)}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_S^2}}, \quad (3)$$

где Φ_M — функция надежности по средним значениям величин; σ_R, σ_S — дисперсии величин R и S.

Основной задачей при проектировании и эксплуатации сооружения является контроль показателя надёжности, т. е. сопоставление проектного или фактического индекса надежности с некоторым целевым показателем [6]. Условие надежности может быть представлено в виде формулы (4):

$$\beta_\Phi \leq [\beta], \quad (4)$$

где $[\beta]$ — целевой индекс надежности конструкции; β_Φ — фактический (или проектный) индекс надежности.

Определение целевого уровня и индекса надежности

Determination of the target level and reliability index

В соответствии с JCSS Probabilistic Model Code^{4 8} под целевым уровнем надежности понимается минимальный требуемый уровень надежности. Исходя из этого требования к безопасности конструкции описаны минимально допустимые значения индекса надежности (или максимально допустимой вероятности разрушения).

⁸ JCSS Probabilistic Model Code //Joint Committee of Structural Safety [Electronic resource]. — 2001. — Mode of access: <http://www.jcss.ethz.ch>.

В соответствии с руководством к Еврокодам (Implementation of Eurocodes Handbook)⁹ значения индексов надежности представлены для периодов 1 и 50 лет и зависят от классов надежности сооружения. Данные классы надежности оцениваются последствиями от потери человеческих жизней, экономических, социальных и экологических последствий к которым приведет разрушение сооружения. Данные классы и значения индексов надежности конструкций коррелируются с представленными в отечественных методических рекомендациях¹⁰ и представлены для I группы предельных состояний (табл. 1, 2).

Таблица 1 / Table 1

Классификация показателей надежности в соответствии с EN1990

Classification of Reliability Indicators in Accordance with EN1990

Классы надежности <i>Reliability classes</i>	Последствия от потери человеческих жизней, экономические, социальные и экологические последствия <i>Consequences from loss of life, economic, social and environmental impacts</i>	Индекс надежности β <i>Reliability Index β</i>		Примеры зданий и гражданских инженерных сооружений <i>Examples of buildings and civil engineering structures</i>
		β_a для $T_a = 1$ год <i>β_a for $T_a = 1$ year</i>	β_a для $T_a = 50$ лет <i>β_a for $T_a = 50$ years</i>	
3 — высокая <i>3 — high</i>	Значительные <i>Significant</i>	5,2	4,3	Мосты, общественные здания <i>Bridges, public buildings</i>
2 — нормальная <i>2 — normal</i>	Средние <i>Medium</i>	4,7	3,8	Жилые и офисные здания <i>Residential and office buildings</i>
1 — низкая <i>1 — low</i>	Незначительные <i>Insignificant</i>	4,2	3,3	Сельскохозяйственные сооружения теплицы <i>Agricultural buildings Greenhouses</i>

Разработана авторами на основании руководства⁹ / Developed by the authors based on the manual⁹

Как отмечается в ряде работ [7; 8], целевые индексы надежности могут назначаться заказчиками на основании собственных рекомендаций и стратегий эксплуатации мостовых сооружений. Для особых условий эксплуатации целевые индексы могут быть определены по результатам предварительных научных исследований с соответствующим сопровождением [9; 10].

⁹ Руководство 2 по использованию ЕВРОКОДОВ. Базовые принципы конструктивной надежности (IMPLEMENTATION OF EUROCODES HANDBOOK 2), 2015.

¹⁰ Методические рекомендации. Методика оценки остаточного ресурса несущих конструкций зданий и сооружений / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве», 2018.

Таблица 2 / Table 2

**Рекомендуемые минимальные значения индекса
надежности для предельных состояний по несущей способности**

Recommended minimum values of reliability index for limit states for load-bearing capacity

Класс ответственности сооружений <i>Liability class of structures</i>	Минимальные значения β при базовом периоде <i>Minimum values β for the base period</i>	
	1 год / 1 year	50 лет / 50 years
КС-3 / КС-3	5,2	4,3
КС-2 / КС-2	4,7	3,8
КС-1 / КС-1	4,2	3,3

Разработана авторами на основании рекомендаций¹⁰ / Developed by the authors on the basis of recommendations¹⁰

В текущем исследовании целевой индекс надёжности при проверках по I группе предельных состояний принят равным $[\beta] = 4,3$, как для сооружений с высоким классом ответственности (КС-3).

Методы оценки показателей надежности

Methods of reliability index estimation

Для численного определения показателей надежности (вероятности отказа и индекса надежности) были использованы методы FORM и SORM (First-order Reliability Method и Second-order Reliability Method) [11].

Данные методы основаны на нормализованных распределениях для каждой переменной. Первым этапом работы с этими методами является приведение исходных переменных к стандартным нормальным распределениям (формула 5):

$$X = (X_1, X_2, X_3 \dots X_n) \rightarrow U = (U_1, U_2, U_3 \dots U_n), \quad (5)$$

где $U_1, U_2, U_3 \dots U_n$ являются независимыми переменными со стандартным нормальным распределением (т. е. с нулевым средним значением, и единичным стандартным отклонением).

В полученном гауссовском пространстве находят «расчетную» точку, которая является ближайшей точкой от исходной точки до преобразованной поверхности предельного состояния $g(u) \leq 0$, расстояние от данной точки до исходной обозначают как индекс надежности β . Основной задачей является нахождение расчетной точки при помощи определенного алгоритма поиска.

В случае использования метода FORM (The First-Order Reliability Method или метод надежности первого порядка) аппроксимация ведется линейным методом, то есть поверхность предельного состояния аппроксимируется касательной к ней гиперплоскостью в расчетной точке. Вероятность разрушения в таком случае аппроксимируется следующим образом (формула 6):

$$p_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta), \quad (6)$$

где Φ — вероятностная нормальная распределения переменной.

При использовании метода SORM (The Second-Order Reliability Method или метод надежности второго порядка) поверхность разрушения аппроксимируется функцией второго порядка (квадратичная аппроксимация). По методу SORM поверхность разрушения аппроксимируется гиперпараболоидом, который пересекает расчетную точку и характеризуется такой же кривизной (формула 7):

$$p_f = \Phi(-\beta) \prod_i^n (1 - k_i \beta)^{-\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где k — различные индивидуальные значения кривизны в расчетной точке.

Объект моделирования

Modelling object

Для апробации алгоритма было выбрано условное разрезное железобетонное пролетное строение, представляющее собой систему из семи железобетонных тавровых балок длиной по 18 метров. Принципиальная схема пролетного строения и балки приведена на рисунке 3.

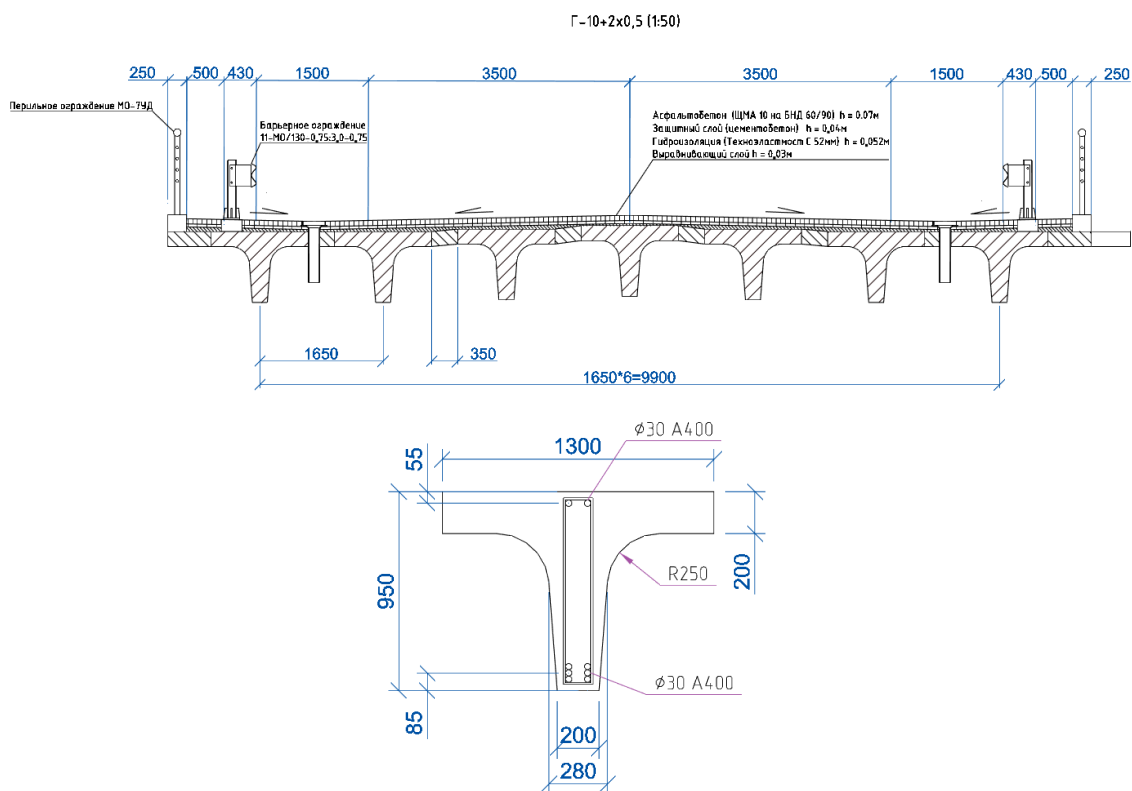


Рисунок 3. Принципиальная схема пролетного строения (разработан авторами)

Figure 3. Schematic diagram of the span structure (developed by the authors)

Для экономии вычислительных ресурсов при определении показателей надежности анализу подверглась плоская расчетная схема одной балки, пространственный характер работы пролетного строения был учтен путем использования КПУ (коэффициента поперечной установки). Линия влияния для определения КПУ, а также схема установки проектной нагрузки в поперечном направлении приведена на рисунках 4 и 5 соответственно.

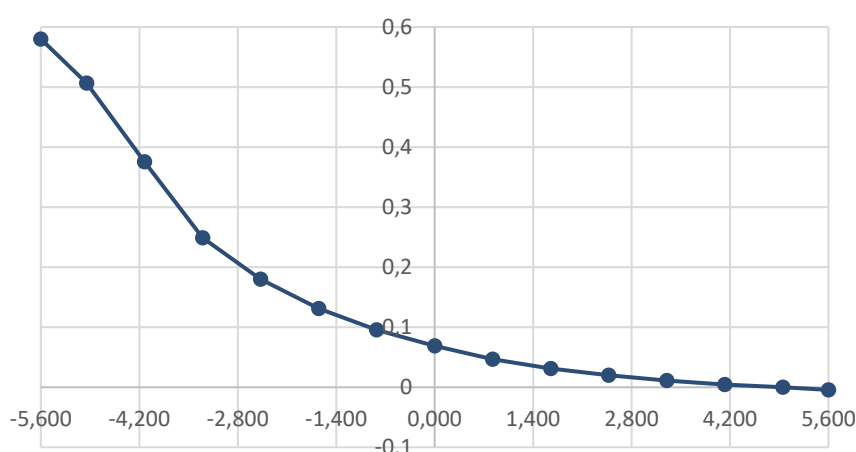


Рисунок 4. Поперечная линия влияния для определения КПУ для изгибающего момента в середине пролета для наиболее нагруженной балки (крайней левой) (разработан авторами)

Figure 4. Transverse influence line for determining the coefficient of transverse installation for the bending moment at mid-span for the most heavily loaded beam (extreme left) (developed by the authors)

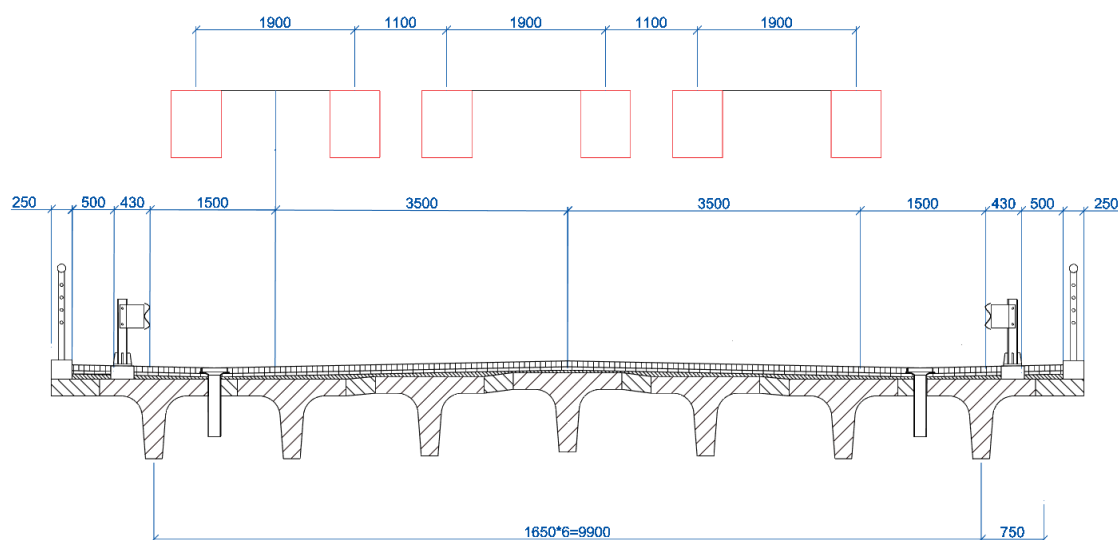


Рисунок 5. Наиболее невыгодное расположение проектной нагрузки АК (разработан авторами)

Figure 5. The most disadvantageous location of the design load AK (note: AK — load model in accordance with the Russian standard СП 35.13330.2011) (developed by the authors)

В качестве проектных материалов принят бетон В35 с армированием из стали А400 с расчетными характеристиками по СП 35.13330.2011.¹¹

Вероятностные модели характеристики материала конструкций

Probabilistic models of structural material characterisation

При определении свойств материала возникает ряд сложностей, связанных с неточностью и неопределенностью некоторых его параметров, вызванных:

- различием результатов лабораторных испытаний материала и фактических показателей, достигнутых при его практическом использовании;
- условиями лабораторных испытаний, которые являются более идеализированными и не отражают реальную работу материала в конструкции;
- изменчивостью свойств материала во времени.

Чтобы учесть данные неопределенности и предусмотреть возможное изменение свойств материала со временем возможно описывать его параметры как случайные величины с определенными распределениями:

1. Для задания проектных характеристик бетона был применен набор параметров из JCSS (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Нормативные параметры распределения характеристик бетона

Regulatory parameters for the distribution of concrete properties

Параметр <i>Parameter</i>	Тип <i>Type</i>	Мат. ожидание <i>Mathematical expectation</i>	Стандартное отклонение <i>Standard deviation</i>	Коэффициент вариации <i>Coefficient of variation</i>
Rb	Lognormal	35	5,95	0,17
Eb	Normal	34 500	103,5	0,03

Разработана авторами / Developed by the authors

2. Для задания «фактических» прочностных параметров бетона были использованы данные серии испытаний методом ультразвукового контроля на эксплуатируемом объекте-аналога. По результатам статистического анализ были определены значения математического ожидания $M = 43,71$ и среднеквадратического отклонения $\sigma = 2,9$ (коэффициент вариации $Cv = 0,07$). Результаты серии измерений и полученный в результате их анализа график функции распределения

¹¹ СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменением N 1).

приведен на рисунке 6.

№	1	2	3	4	5	6
R, МПа	46	47,6	44,4	47,2	46,5	45,7
№	7	8	9	10	11	12
R, МПа	47,5	46,5	43,5	42,4	40,9	42,5
№	13	14	15	16	17	18
R, МПа	41,9	43,1	43,9	43,4	39,7	40,5
№	19	20	21	22	23	24
R, МПа	45,3	39,2	37,3	43,2	46	46,7
№	25	26	27	28	29	30
R, МПа	44	43,1	44,6	37,5	43,2	47,9

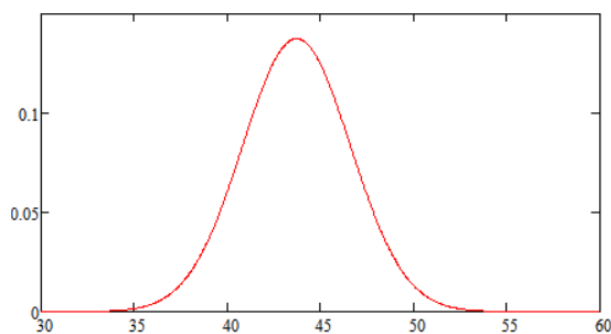


Рисунок 6. Результаты серии измерений и график функции распределения величины прочности бетона (разработан авторами)

Figure 6. Results of a series of measurements and a graph of the distribution function of concrete strength value (developed by the authors)

Метод задания проектной нагрузки в вероятностной постановке

Method of setting the design load in a probabilistic formulation

Для описания величины воздействий от проектных транспортных нагрузок (А14) в вероятностной постановке коэффициент надёжности γ_f был задан как случайная величина K , для которой было подобрано такое нормальное гауссовское распределение (формула 8) с параметрами $M = 1$, $\sigma = 0,172$, при котором допускалась 1 % вероятность выхода значения K за пределы «стандартного» значения $\gamma_f = 1,4$ (99 % обеспеченность). Функция распределения для вероятностного коэффициента K приведена на рисунке 7.

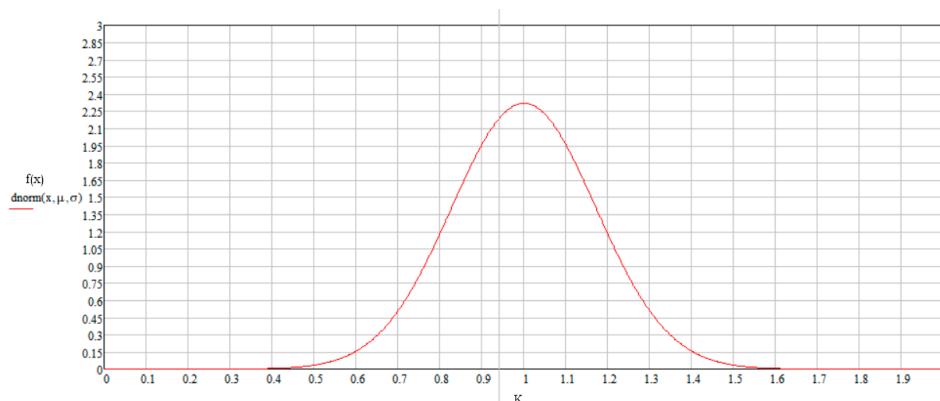


Рисунок 7. Функция распределения для вероятностного коэффициента K (разработан авторами)

Figure 7. Distribution function for the probabilistic coefficient K (developed by the authors)

Общая величина нагрузки определялась как $P = P^{A14} \cdot K$, где P^{A14} — величина нагрузки, определяемая в соответствии с требованиями СП 35.13330.2011 с учетом единичного значения коэффициента

надежности (включая динамический коэффициент и коэффициенты полосности). Для распределенной части нагрузки величина определялась как $q = q^{A14} \cdot K \cdot (1,15/1,40)$, где q^{A14} — величина распределенной нагрузки, определяемая в соответствии с требованиями СП 35.13330.2011 с учетом единичного значения коэффициента надежности.

$$K(x) = \frac{1}{0.172\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-1)^2}{2 \cdot 0.172^2}}. \quad (8)$$

Метод задания эквивалентной нагрузки на основе данных о составе движения

Method for specifying equivalent load based on traffic composition data

Вероятностная модель нагрузки от транспортного потока была разработана на основе статистического анализа состава движения автомобильного потока, проходящего по искусственному сооружению. В качестве исходных данных были взята статистика движения автомобильного транспорта на участке Эжва-Сыктывкар в период с 01.01.2019 по 31.12.2019 полученная на стационарном посту весового контроля. В результате анализа годовой статистики движения транспорта была построена гистограмма плотности вероятности проезда определенной категории транспорта (рисунок 9; разбивка на категории приведена в соответствии с Приложением N 3 Приказа Минтранса России от 29.03.2018 N 119).

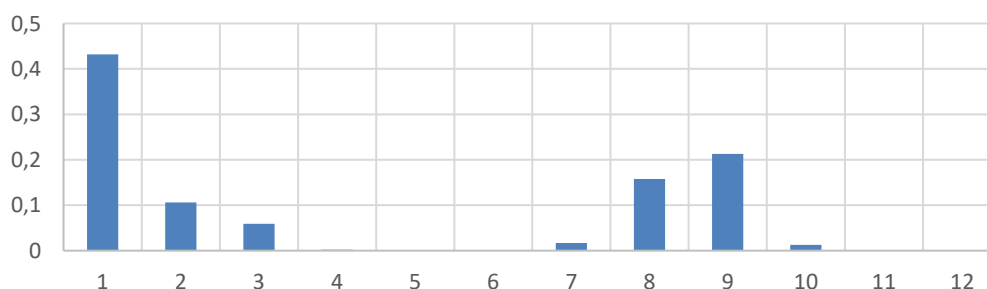


Рисунок 8. Гистограмма вероятности проезда
категорий транспортных средств (разработана авторами)

Figure 8. Histogram of the probability
of passing categories of vehicles (developed by the authors)

Был произведен анализ и усреднение габаритов колесных баз транспортных средств для моделирования нагрузки от транспорта представленных категорий. Для оценки влияния грузового транспорта с различными колесными базами был проведен оценочный расчет с учетом коэффициентов распределения массы по осям транспортного средства основанном на рекомендациях ОДН 218.0.032-2003 (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

Оценочные коэффициенты распределения массы
по осям транспортного средства и суммы ординат линии влияния

Estimating coefficients for mass distribution along
vehicle axles and the sum of ordinates of the influence line

Номер оси Axle number	Коэффициенты распределения массы по осям, k Axle weight distribution coefficients, k				Сумма Sum	Сумма с учетом коэффициентов Sum including coefficients
	1	2	3	4		
2-осная 2-axle	0,375	0,625	—	—	6,9	3,713
3-осная 3-axle	0,231	0,385	0,385	—	10,99	3,819
4-осная 4-axle	0,167	0,278	0,278	0,278	12,87	3,375

Разработана авторами / Developed by the authors

Были рассчитаны суммы ординат линии влияния моментов под осями транспортных средств для различных положений нагрузки, а также данные суммы с учетом коэффициента распределения массы по осям транспортного средства.

$$M = (y_1 k_1 + y_2 k_2 + \dots + y_n k_n) m g * \text{КПУ} * (1 + \mu) * \gamma_f. \quad (9)$$

Таким образом, значением выражения можно $(y_1 k_1 + y_2 k_2 + \dots + y_n k_n)$ оценить и сравнить влияние распределения массы по осям и геометрии тележки на итоговое значение усилия в балке и определить наиболее невыгодную нагрузку для данного пролетного строения.

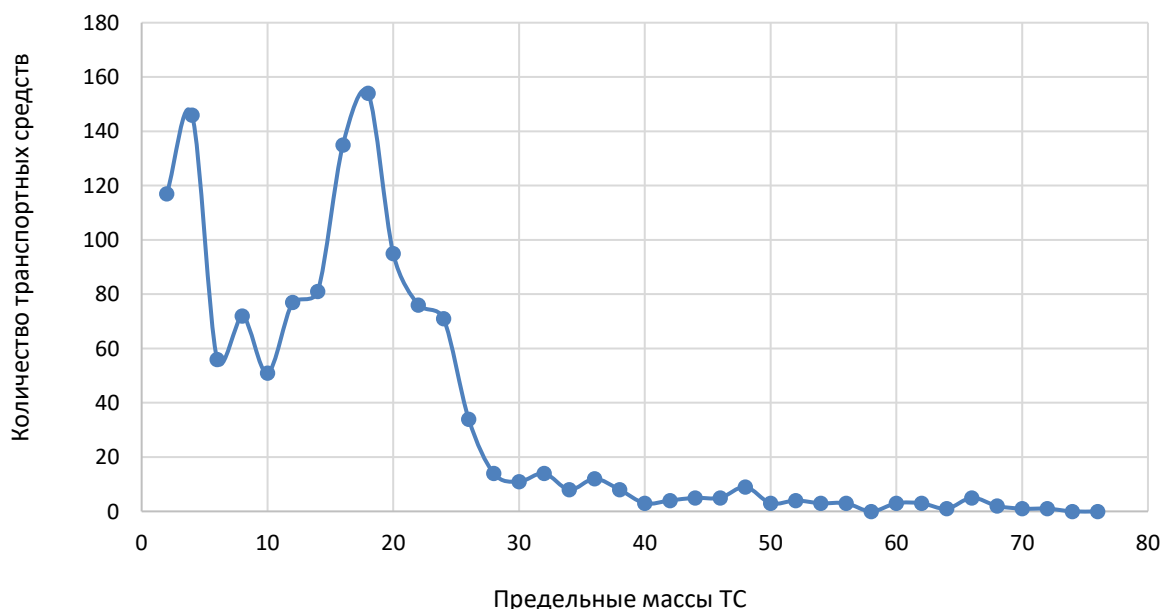


Рисунок 9. Гистограмма распределения проездов транспортных средств по их полным массам (разработана авторами)

Figure 9. Histogram of the distribution of vehicle passages by their gross weights (developed by the authors)

В качестве расчетной тележки была принята задняя двухосная тележка одиночного грузовика (на примере КАМАЗ 43118: расстояние между осями 1 320, расстояния поперек — 2 050 мм), так как она обеспечивает наибольшее значение суммы с учетом коэффициентов.

Для моделирования нагрузки предлагается использовать вероятностную модель распределения массы грузового транспортного средства, получаемой на основании результатов измерения массы транспортных средств при помощи пунктов весового контроля.

В качестве примера были рассмотрены данные, полученные пунктом весового контроля на автомобильной дороге Визинга — Кажым км 4+070 — км 4+770 за 2018–2019 г. В результате анализа массового состава транспорта был построен график распределения масс, где значения $y_i = p(x_{i-1} < m < x_i)$ (рис. 9).

Для оценки и моделирования вероятностной нагрузки необходимо привести дискретное распределение масс к определенной функции распределения. Было принято решение использовать 3 логнормальных распределения: для левой и правой части графика, а также функцию распределения с большим значением стандартного отклонения и среднего (рис. 10).

Для решения задачи моделирования появления транспортного средства заданной массы используется приближение, позволяющее оценить появление наиболее неблагоприятного загрузки.

В случае полученной статистики движения к этой категории относятся транспортные средства массой > 45 тонн. Предлагаемый вариант решения проблемы — использование функции распределения, интеграл которой на промежутке равен интегралу представленной функции на том же промежутке.

$$f''(x) = 1/(x * 1.6 * \sqrt{2\pi}) e^{(-(\ln x - 2.632)^2 / (2 * 1.6^2))}. \quad (9)$$

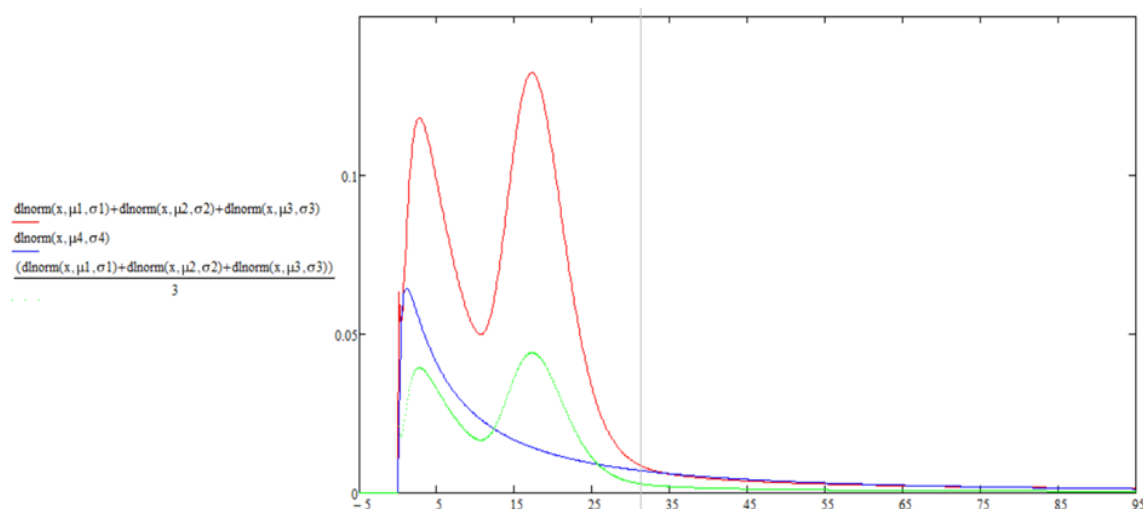
Для оценки воздействия на пролетное строение фактической нагрузки и определения ее положения был произведен анализ возможных вариантов движения транспорта по пролетному строению (рис. 11).

Было выделены две области наиболее вероятного положения грузового транспортного средства, соответствующие автомобильным полосам движения, а также приведены вероятностные функции, по которым можно оценить данное положение.

Ограничением полос проезда служат разделительная полоса и положение транспортного средства, при котором край колеса отступает от барьерного ограждения на 250 мм (аналогично требованиям, представленным в СП 35.13330 для нагрузки АК).

В таблице 5 приведены параметры для моделирования случайных величин $V = V_{\text{пост}} + K \cdot V_{\text{вер}}$ фактической нагрузки [14]; на рисунке 10 приведена схема к определению коэффициентов поперечной установки в вероятностной поставке ($\text{КПУ} = \text{КПУ1} + \text{КПУ2}$).

При этом на участке расположения транспортного средства ведется аппроксимация функции КПУ к линейной.



красный — функция суммы трех распределений; зеленый — функция суммы трех распределений, приведенная по площади к единому; синий — итоговое распределение

Рисунок 10. Вариант искомого распределения (разработан авторами)

red — function of the sum of three distributions; green — function of the sum of three distributions reduced by area to a single distribution; blue — final distribution

Figure 10. Variant of the desired distribution (developed by the authors)

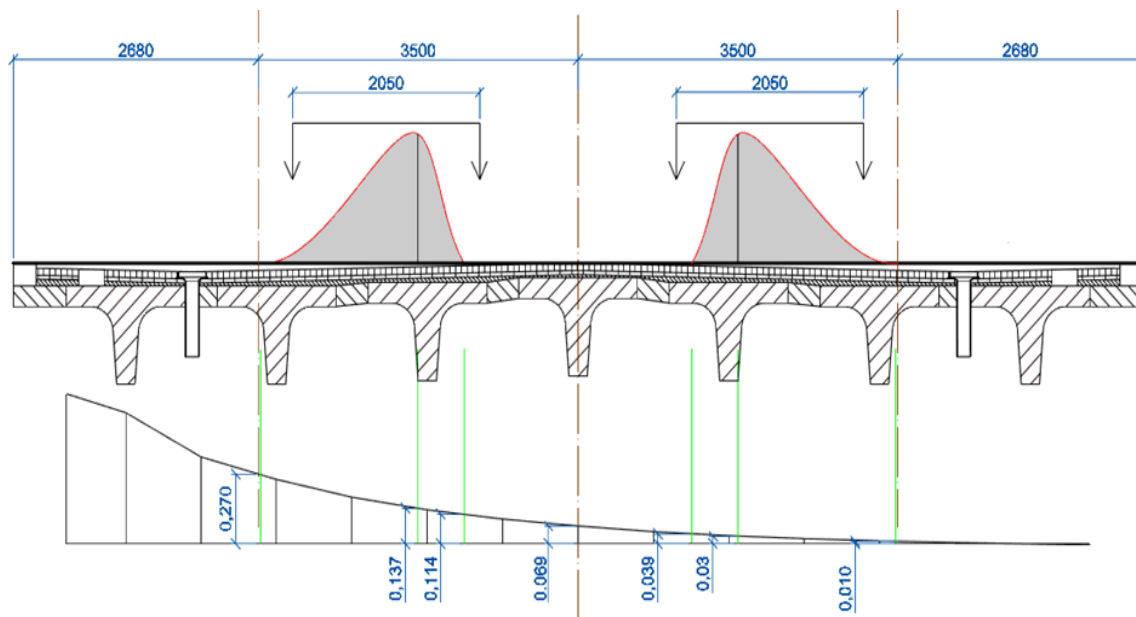


Рисунок 11. Распределение фактических нагрузок (разработан авторами)

Figure 11. Distribution of actual loads (developed by the authors)

Таблица 5 / Table 5

Параметры для моделирования фактического нагружения

Parameters for modelling the actual loading

Параметр нагрузки <i>Load parameter</i>	Закон распределения <i>Distribution law</i>	Постоянная часть величины <i>Constant part of the value</i>	Переменная часть величины <i>Variable part of the value</i>		
			коэф. к значениям <i>coefficient to values</i>	среднее значение <i>mean value</i>	стандартное отклонение <i>standard deviation</i>
		$V_{\text{пост}}$			
			K	MV	SD
Осевая нагрузка <i>Axial load</i>	логнормальный <i>lognormal</i>	0	1	140	$140 \cdot 0,2 = 28$
Динамический коэффициент <i>Dynamic coefficient</i>	логнормальный <i>lognormal</i>	1	0,4	1	1,25
КПУ1 — левая полоса <i>Coefficient of transverse installation 1 — left lane</i>	логнормальный <i>lognormal</i>	0,114	0,022	1	0,2
КПУ2 — правая полоса <i>Coefficient of transverse installation 2 — right lane</i>	логнормальный <i>lognormal</i>	0,039	-0,022	1	0,3

Разработана авторами / Developed by the authors

Результаты

Results

Алгоритм определения фактического индекса надежности эксплуатируемого разрезного железобетонного пролетного строения с учетом в общем случае может быть сведен к следующим задачам:

1. Определение базового набора переменных, задаваемых случайными величинами (в общем случае — величина несущей способности балки, зависящая, в первую очередь, от класса прочности бетона, и величина нагрузки на пролетного строения).
2. Определение параметров распределения для переменной, описывающей прочность бетона (по результатам испытаний неразрушающими методами).
3. Определение параметров распределения для переменной, описывающей нагрузки на пролетного строения (по результатам статистического анализа данных по интенсивности движения на участке дороги расположения мостового сооружения).
4. Формулирование целевой функции отказа с учетом вероятных переменных (для железобетонных балок удобно использовать сопоставление величин изгибающих моментов).
5. Расчет показателей надежности пролетного строения с использованием методов FORM или SORM.

Принципиальная блок-схема алгоритма приведена на рисунке 12.

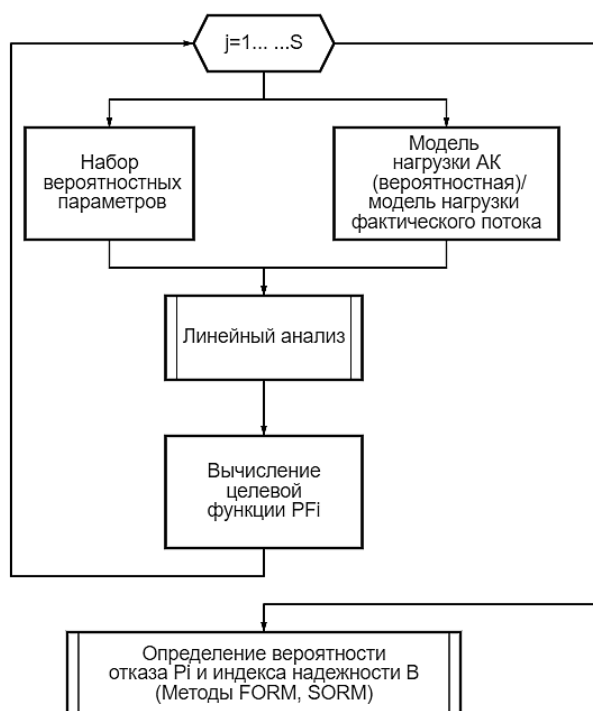


Рисунок 12. Блок-схема алгоритма определения количественных показателей надежности конструкций с использованием методов FORM или SORM (разработан авторами)

Figure 12. Block diagram of the algorithm for determining quantitative indicators of structural reliability using FORM or SORM methods (developed by the authors)

Results

Probability of failure	(SORM)	Pf	1.78456E-03
Reliability index	(SORM)	Beta	2.91394E+00
Probability of failure	(FORM)	Pf	1.78457E-03
Reliability index	(FORM)	Beta	2.91394E+00
Number of performance function evaluations		nfunc	36
Number of gradient evaluations			4

Scaled state-function value at approx. design point -5.05856E-08
Weighting factor used for the state-function 2.41315E+03
a) Norm of U-space gradient at u* 2.65697E-01

Results

Probability of failure	(SORM)	pf*****
Reliability index	(SORM)	Beta 2.56484E+01
Probability of failure	(FORM)	pf*****
Reliability index	(FORM)	Beta 2.56516E+01
Number of performance function evaluations		nfunc 85
Number of gradient evaluations		8

Scaled state-function value at approx. design point -2.32828E-09
Weighting factor used for the state-function 6.55368E+03
б) Norm of U-space gradient at u* 1.41412E-02

Рисунок 13. Результаты расчета показателей надежности методами FORM и SORM для двух вариантов наборов переменных (разработан авторами)

Figure 13. Results of reliability indices calculation using FORM and SORM methods for two variants of variable sets (developed by the authors)

Результаты определения проектного и фактического индекса надежности рассмотренного примера пролетного строения с применением методами FORM и SORM приведены на рисунках 13а и 13б (для проектного и фактического соответственно), а также в таблице 6.

Таблица 6 / Table 6

Индексы надежности рассмотренного пролетного строения

Reliability indices of the considered span structure

	Проектный <i>Design</i>	Фактический <i>Actual</i>	Целевой <i>Target</i>
Индекс надежности <i>Reliability index</i>	2.91	2.56	4.3

Разработана авторами / Developed by the authors

Анализ результатов

Analysis of results

В ходе проведения исследования был разработан и апробирован алгоритм определения индексов надежности разрезных железобетонных пролетных строений с учетом фактических характеристик материалов и фактической нагруженной. Одной из наиболее сложных задач при выполнении алгоритма является корректное задание величины нагрузки от фактического транспортного потока. В ходе работы было отмечено, что на сегодняшний день существуют следующие проблемы при реализации этого этапа:

1. Данные с пунктов автоматического весового контроля доступны в двух вариантах: распределения транспортных средств по их категориям (рис. 8) и распределение транспортных средств по их общей массе (рис. 9). В то же время, для разрезных железобетонных пролетных строений небольшой длины определяющей является не полная масса транспортного средства, а нагрузка на тележку. Таким образом, фактически необходимо проводить «обратное» восстановление данных по осевым нагрузкам.

2. В общем случае распределение масс транспортных средств описывается сложными моделями распределений (рис. 9), представляющими из себя сумму простых (нормальных или логнормальных). К сожалению, часть инженерных инструментов для вероятного анализа позволяют задавать для переменных лишь стандартные простые распределения, что приводит к дополнительному упрощению модели распределения (рис. 10).

Для рассмотренного пролетного строения были определены проектный и фактический индекс надежности; их величины составили $\beta = 2,91$ и $\beta = 2,56$ соответственно (табл. 6). Следует заметить, что фактический индекс надежности оказался ниже проектного на 13 %, что

свидетельствует о необеспеченности проектной надежности пролетного строения. Причина необеспеченности, вероятно, заключается в превышении проектных нагрузок максимальными фактическими из-за возможности движения по мосту грузовых автомобилей со значительным перегрузом.

Также необходимо отметить, что фактический и проектный индекс надежности значительно меньше установленного в рамках исследования целевого значения $[\beta] = 4,3$. Процент снижения достигает 40 % для фактического индекса и 33 % для проектного индекса. Данного снижения объясняется, в том числе, отсутствием на сегодняшний день в отечественных нормах изначальной связи коэффициентов надежности и общих показателей надежности.

Заключение

Conclusion

В рамках данного исследования авторами алгоритм определения показателей надежности разрезного железобетонного пролетного строения с учетом фактических распределений случайных величин и проведена его апробация на примере определения показателя надежности конструкции (индекса β) условного разрезного ребристого железобетонного пролетного строения автодорожного моста. Для моделирования фактической нагрузки от транспортного потока было использовано распределение, полученное на основании данных с пунктов автоматизированного весового контроля. По результатам сопоставления индексов надежности было отмечено, что для конкретного рассмотренного случая фактический индекс надежности $\beta = 2,56$ на 13 % меньше проектного $\beta = 2,91$ и почти что на 40 % меньше целевого индекса надежности $[\beta] = 4,3$, принятого по рекомендациям зарубежных норм. Разработанный в ходе исследования алгоритм может быть применен в дальнейшем для определения показателей надежности существующих эксплуатируемых сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Crawford, K.C.** Perspective Chapter: Bridge Deterioration and Failures / K. C. Crawford. — DOI <https://doi.org/10.5772/intechopen.109927> // Failure Analysis — Structural Health Monitoring of Structure and Infrastructure Components / IntechOpen, 2023. — URL: <https://www.intechopen.com/chapters/85946>. (дата обращения: 06.08.2024).
2. **Майстренко, И.Ю.** Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 / И.Ю. Майстренко, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/13TS417> // Транспортные сооружения. — 2017. — Т 4. — № 4. — С. 13TS417. — URL: <https://t-s.today/13TS417.html>. — EDN NRLEKT. (дата обращения: 06.08.2024).

3. **Овчинников, И.Г.** Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 2 / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, И.Ю. Майстренко [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/14TS417> // Транспортные сооружения. — 2017. — Т 4. — № 4. — С. 14TS417. — URL: <https://t-s.today/14TS417.html>. — EDN YPUCTS. (дата обращения: 06.08.2024).
4. Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering / DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73366-0>. — Под ред. Griffiths D.V., Fenton G.A. — Вена: Springer, 2007. — 346 с. — URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-211-73366-0> (дата обращения: 06.08.2024).
5. **Шестовицкий, Д.А.** Обоснование надёжности и сроков службы проектируемых мостов / Д.А. Шестовицкий // Дороги и мосты. — 2021. — № 2. — С. 203–227. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47340780>. — EDN IAJNYA. (дата обращения: 06.08.2024).
6. **Козак, Н. В.** Определение количественных показателей надёжности сталежелезобетонной балки с учетом накопления усталостных повреждений в гибких штыревых упорах / Н.В. Козак, А.В. Сырков, В.А. Быстров [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/05SATS423> // Транспортные сооружения. — 2023. — Т 10. — № 4. — С. 05SATS423. — URL: <https://t-s.today/05SATS423.html>. — EDN IXCUG. (дата обращения: 06.08.2024).
7. **Sykora, M.** Target Reliability Levels for Existing Bridges Considering Emergency and Crisis Situations / M. Sykora, M. Holicky, R. Lenner, P. Manas // Advances in Military Technology. — 2014. — Т 9. — № 1. — С. 45–57. — URL: <https://www.aimt.cz/index.php/aimt/article/view/1025>. (дата обращения: 06.08.2024).
8. **Eidsvig, U.** Risk Assessment of Terrestrial Transportation Infrastructures Exposed to Extreme Events / U. Eidsvig, M. Santamaría, N. Galvão, N. Tanasic [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.3390/infrastructures6110163> // Infrastructures. — 2021. — Т 6. — № 11. — С. 163. — URL: <https://www.mdpi.com/2412-3811/6/11/163>. (дата обращения: 06.08.2024).
9. **Frangopol, D.M.** Bridge System Reliability and Reliability-Based Redundancy Factors / D.M. Frangopol, B.M. Kozy, B. Zhu, S. Sabatino. — Бетлехем: US Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2019. — 62 с. — URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/50755> (дата обращения: 06.08.2024).
10. **Safari, M.** Target reliability analysis of bridge piers concerning the earthquake extreme event limit state / M. Safari, S.H. Ghasemi, S.A. Haj Seiyed Taghia. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112910> // Engineering Structures. — 2021. — Т 245. — С. 112910. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029621010580>. (дата обращения: 06.08.2024).
11. **Надольский, В.В.** Обзор современных методов определения вероятности отказа / В.В. Надольский, Ф.А. Верева // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы международных академических чтений, Курск, 24–25 ноября 2017 г. / гл. ред. С.И. Меркулов Курск: 2017. — С. 98–104. — URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/118496?show=full>. (дата обращения: 06.08.2024).
12. **Савчинский, Б.В.** Критерии оценки надёжности железобетонных пролетных строений автодорожных мостов / Б.В. Савчинский // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. — 2021. — № 19. — С. 229–231. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47340780>. — EDN UBRILH. (дата обращения: 06.08.2024).
13. **Kainz, C.** Modelling of Traffic Loads in a Full-Probabilistic Reassessment of Rural Bridges Based on Measurement Data — A Case Study / C. Kainz, L. Lapidus, T. Braml. — DOI https://doi.org/10.1007/978-3-031-60271-9_17 // 20th International Probabilistic Workshop. IPW 2024. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 494 / Кам: Springer, 2024. — С. 197–208. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-60271-9_17. (дата обращения: 06.08.2024).

14. **Kozak, N.** Influence of Stud Shear Connectors Fatigue on the Entire Reliability of Composite Bridge Superstructure / N. Kozak, J.C. Matos, H. Sousa, A. Syrkov, D. Yaroshutin, V. Bystrov. — DOI https://doi.org/10.1007/978-3-031-60271-9_4 // Matos, J.C., et al. 20th International Probabilistic Workshop. IPW 2024. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 494 / Кам: Springer, 2024. — С. 62–72. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-60271-9_4. (дата обращения: 06.08.2024).
15. **Кухтин, В.Н.** Применение расчётного комплекса SOFiSTiK для расчёта мостовых конструкций / В.Н. Кухтин, И.В. Булаев, И. С. Баранов. — Москва: МАДИ, 2015. — 136 с. — URL: <https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel15E278.pdf> (дата обращения: 06.08.2024).
16. **Schneider, J.** Introduction to safety and reliability of structures / J. Schneider, T. Vrouwenvelder. — DOI <https://doi.org/10.2749/sed005>. — Цюрих: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 1997. — 148 с. — URL: <https://structurae.net/en/literature/book/introduction-to-safety-and-reliability-of-structures> (дата обращения: 06.08.2024).

Сведения об авторах:

Рудаков Игорь Алексеевич — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: igorrudakov051102@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6035-2550>

Козак Николай Викторович — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7707-4388>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1018546
ResearchGate: www.researchgate.net/profile/Nikolai-Kozak-2
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207108767>

Статья получена: 16.10.2024. Принята к публикации: 15.12.2024. Опубликовано онлайн: 29.12.2024.

Статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательской работы, проводимой в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ обучающимися СПбГАСУ в 2024 году. Номер гранта: 36С24

REFERENCES

1. Crawford K.C. Perspective Chapter: Bridge Deterioration and Failures. In: *Failure Analysis — Structural Health Monitoring of Structure and Infrastructure Components*. IntechOpen; 2023. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/85946> (accessed 06th August 2024). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.109927>.
2. Maystrenko I.Y., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 1. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2017;4(4): 13TS417. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/13TS417>.
3. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Y., Kokodeev A.V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 2. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2017;4(4): 14TS417. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/14TS417>.

4. Griffiths D.V., Fenton G.A. eds. Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering. Vienna: Springer; 2007. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-211-73366-0> (accessed 06th August 2024). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73366-0>.
5. Shestovitskiy D.A. [Justification of reliability and service life of designed bridges]. Roads and bridges. 2021;(2): 203–227. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47340780> (accessed 06th August 2024). (In Russ.).
6. Kozak N.V., Syrkov A.V., Bystrov V.A., Yaroshutin D.A., Shestovitskiy D.A. Quantitative reliability measures determination of a steel-reinforced concrete beam taking into account fatigue damage accumulation in flexible pin stops. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2023;10(4): 05SATS423. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/05SATS423>.
7. Sykora M., Holicky M., Lenner R., Manas P. Target Reliability Levels for Existing Bridges Considering Emergency and Crisis Situations. *Advances in Military Technology*. 2014;9(1): 45–57. Available at: <https://www.aimt.cz/index.php/aimt/article/view/1025> (accessed 06th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
8. Eidsvig U., Santamaría M., Galvão N., Tanasic N. et al. Risk Assessment of Terrestrial Transportation Infrastructures Exposed to Extreme Events. *Infrastructures*. 2021;6(11): 163. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures6110163>.
9. Frangopol D.M., Kozy B.M., Zhu B., Sabatino S. Bridge System Reliability and Reliability-Based Redundancy Factors. Bethlehem: US Department of Transportation, Federal Highway Administration; 2019. Available at: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/50755> (accessed 06th August 2024). (In Eng.).
10. Safari M., Ghasemi S.H., Haj Seiyed Taghia S.A. Target reliability analysis of bridge piers concerning the earthquake extreme event limit state. *Engineering Structures*. 2021;245: 112910. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112910>.
11. Nadol'skiy V.V., Verevka F.A. [Review of modern methods for determining the probability of failure]. In: [Safety of the Russian construction stock. Problems and solutions: materials of international academic readings, Kursk, November 24–25, 2017]. Kursk; 2017. p. 98–104. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/118496?show=full> (accessed 06th August 2024). (In Russ.).
12. Savchynskiy, B.V. Criteria for Evaluating the Reliability of Reinforced Concrete of Highway Bridges Superstructures. *Newsletter of the Dnipropetrovsk National University of Transport. Academician V. Lazaryan*. 2021;(19): 229–231. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47340780> (accessed 06th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
13. Kainz C., Lapidus L., Braml T. Modelling of Traffic Loads in a Full-Probabilistic Reassessment of Rural Bridges Based on Measurement Data — A Case Study. In: Matos, J.C., et al. *20th International Probabilistic Workshop. IPW 2024. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 494. Cham: Springer; 2024. p. 197–208. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-60271-9_17 (accessed 06th August 2024). (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-60271-9_17.
14. Kozak N., Matos J.C., Sousa H., Syrkov A., Yaroshutin D., Bystrov V. Influence of Stud Shear Connectors Fatigue on the Entire Reliability of Composite Bridge Superstructure. In: Matos, J.C., et al. *20th International Probabilistic Workshop. IPW 2024. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 494. Cham: Springer; 2024. p. 62–72. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-60271-9_4 (accessed 06th August 2024). (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-60271-9_4.
15. Kukhtin V.N., Bulayev I.V., Baranov I.S. [Application of the SOFiSTiK calculation complex for calculating bridge structures]. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); 2015. Available at: <https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel15E278.pdf> (accessed 06th August 2024). (In Russ.).

16. Schneider J., Vrouwenvelder T. Introduction to safety and reliability of structures. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE); 1997. Available at: <https://structurae.net/en/literature/book/introduction-to-safety-and-reliability-of-structures> (accessed 06th August 2024). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2749/sed005>.

Information about the authors:

Igor A. Rudakov — Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia, e-mail: igorrudakov051102@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6035-2550>

Nikolai V. Kozak — Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7707-4388>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1018546
ResearchGate: www.researchgate.net/profile/Nikolai-Kozak-2
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207108767>

Submitted: 16th October 2024. Revised: 15th December 2024. Published online: 29th December 2024.

The article is published based on the results of research work conducted within the framework of the grant competition for the implementation of research work by students of SPbGASU in 2024. Grant number: 36C24