ВЕРОЯТНОСТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ МЕГАПОЛИСА

PROBABILITY FORECASTING OF THE TECHNICAL CONDITION OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE CONSTRUCTIONS OPERATED IN MEGALOPOLIS

Освещается предложенная автором методика прогнозирования технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений Санкт-Петербурга. Указано на сложные условия и специфику содержания объектов города. Проведен анализ взаимосвязи графика износа и графика надежности, получено математическое описание последнего. Введены и обоснованы параметрические значения предлагаемой функции зависимости состояния сооружения от времени эксплуатации. Использован аппарат теории надежности и теории вероятности. Прогнозирование достижения конкретного уровня состояния предложено вести с заданными индексами надежности.

Ключевые слова: надежность, железобетонные мостовые сооружения, методы оценки, прогнозирование, техническое состояние.

The article deals with a forecasting technique proposed by the author which can be applied to reinforced concrete bridge structures in Saint Petersburg in operation with the purpose of assessing their technical condition. Maintenance features and hard conditions are considered. The analysis of interrelation between deterioration and reliability schedules is carried out, the mathematical description of the latter is received. Parametrical values of the offered function of the technical condition dependence from service life durability are introduced and substantiated. Reliability and probability theories apparatus is used. It is offered to carry out the forecasting of some specific technical level achievement with a set of reliability indexes.

Keywords: reliability, reinforced concrete bridge structures, estimation methods, forecasting techniques, technical condition.

Введение

Современные подходы к процессу прогнозирования технического состояния мостовых сооружений преимущественно базируются на основе положений методов статистики, теории надежности и теории вероятности.

Существуют определенные исследования и наработки в данной сфере. Краткий обзор основных научных подходов и современных методов прогнозирования долговечности железобетонных конструкций приведен в работах [1–3].

Прогнозирование является временным понятием, а единственный временный технический критерий — «долговечность». Проблемам долговечности железобетонных мостов посвящены многие исследования, среди которых [4–16].

Вместе с тем, следует различать прогнозирование состояния для вновь возводимого объекта и для сооружения, длительное время находящегося в эксплуатации [17].

Также отметим, что по сравнению с объектами, расположенными на сети дорог общего

пользования, искусственные сооружения мегаполисов находятся в более сложных условиях эксплуатации, а потому требуют специальных подходов в управлении техническим состоянием парка мостов [14, 18–22].

Так, специфика строительства и эксплуатации транспортных объектов в Санкт-Петербурге характеризуется негативными факторами (природно-климатического и техногенного характера), активно воздействующими на техническое состояние сооружений. В частности, интенсивность движения и весовые характеристики транспортных нагрузок обуславливают значительно более раннее появление повреждений в железобетонных сооружениях и их более интенсивное развитие, чем на периферии [5, 7, 14, 18–22].

К настоящему моменту как в отечественной, так и зарубежной практике отсутствуют научно обоснованные решения по прогнозированию эксплуатируемых мостовых сооружений, в частности железобетонных, в условиях мегаполиса. Целью настоящей статьи является рассмотрение данной проблемы с выработкой конкретной методики.

Существующие исследования вероятностного прогнозирования, развитие методики прогнозирования

В документе [23] представлена зависимость износа от времени эксплуатации объекта. Нормативный срок службы определяется временем достижения предельного физического износа, значения которого приведены для железобетонных пролетных строений в соответствующих таблицах. Функция износа соответствует функции отказа из теории надежности (рис. 1 и формула (1)):

$$I_t = [e^{\lambda(t_i - T_0)} - 1] 100 \%, \quad (1)$$

где λ — показатель функции износа, отражающий качество конструкций после изготовления и монтажа, качество содержания по принятой стратегии эксплуатации, реальные транспортные и природно-климатические условия функционирования объекта (средняя статистическая величина, полученная для каждого элемента и пролетного строения в целом по результатам обследования более 1000 мостов); t_i — временной параметр (годы); T_0 — период приработки.

Рис. 1. Условный нормативный график долговечности

В теории надежности имеется несколько моделей законов распределения, среди которых основные:

- 1) экспоненциальная;
- 2) модель Вейбулла;
- 3) нормальная;
- 4) логарифмически нормальная.

График, представленный на рис. 1, базируется на первой из перечисленных моделей, т. е. экспоненциальном распределении времени до отказа.

В то же время, анализируя имеющиеся разработки [5–7, 16, 24, 25] в области методики прогнозирования поведения состояния мостового сооружения с течением времени (рис. 2, а–в), следует отметить, что общий вид кривой, характеризующей это поведение, выглядит как кривая порядка x , взятая с обратным знаком (см. рис. 2 [26]). Данный вид кривой наиболее точно отображает действительную картину существования искусственного сооружения. Незначительно меняясь в первые годы существования конструкции, в дальнейшем техническое состояние сооружения изменяется практически в линейной зависимости от периода эксплуатации, и на окончательном периоде «жизни» мостового объекта график зависимости его состояния от времени стремится к вертикальной прямой.

Анализ графиков на рис. 1 и 2, а–в позволяет сказать, что фактически графики износа и зависимости состояния конструкций от времени имеют схожую конфигурацию (лишь обратные по знаку), а общий вид соответствует рис. 2, г.

На первый взгляд, они весьма похожи между собой. Однако у них есть принципиальное расхождение как в физическом смысле, так и в математической интерпретации.

Рис. 2. Кривые зависимости состояния сооружения от его срока службы: а — исследования проф. В. И. Шестерикова; б — исследования проф. А. И. Васильева; в — исследования доц. А. В. Сыркова; г — общий вид кривой

Проиллюстрируем это на рис. 3.

График, обратный функции износа, представлен на рис. 3, а. В этом случае график стремится к оси абсцисс (вернее, не удаляется от нее продолжительное время), т. е. фактически сооружение стремится быть «идеальным» в первые годы службы, и очень продолжительное время.

Во втором случае (рис. 3, б), математическое описание которого дано ниже, график равномерно и постепенно меняет свою кривизну, повторяя реальную зависимость между состоянием конструкции и временем ее эксплуатации.

Следует обратить внимание, что криволинейность функции задается параметром x , принятым равным e ; т. е. на рис. 3, а мы имеем обратное экспоненциальное распределение (зависимость), а на рис. 3, б — степенную функцию с параметром e .

Помимо [5–7, 16, 24–26], применение параметра e (или использование экспоненциального графика функции) при оценке остаточного ресурса также отмечено в работах [9, 27].

Как известно [28], число e является базовым соотношением роста для всех непрерывно расту-

щих процессов. Число e позволяет взять простой темп прироста и вычислить составляющие этого показателя, нормальный рост, при котором с каждой единицей времени все вырастает еще на немного. Число e воплощает в себе идею, что все непрерывно растущие (а в данном случае — непрерывно снижающие уровень своего технического состояния) системы являются масштабированными версиями одного и того же показателя.

Таким образом, функцию, соответствующую графикам на рис. 2, г и 3, б, можно представить в виде

$$W(t) = -t^e, \quad (2)$$

где t — период эксплуатации объекта, годы; $W(t)$ — состояние сооружения, относительные единицы.

В ходе проведенных исследований [10, 19, 20, 26] автором было установлено, что для того, чтобы график функции $W(t)$ отражал настоящие значения в зависимости от времени, необходимо выражение (2) преобразовать к виду

$$W(t) = W_{\text{нач}} - \alpha t^e, \quad (3)$$

где $W_{\text{нач}}$ — начальный уровень состояния сооружения, отн. ед.; α — коэффициент перехода к заданному порядку цифр.

Метод оценки технического состояния сооружения в относительных характеристиках. Начальный уровень состояния

Одной из разновидностей методов оценки в относительных характеристиках является оценка состояния мостовых сооружений с помощью системы коэффициентов, т. е. фактически 100-балльная оценка.

Подобная количественная оценка состояния сооружения реализована в некоторых нормативных документах, например [23, 29] и других, и разработках современных исследователей [4, 5, 14, 16, 25]. Автором изложены подробные разъяснения по данному методу в соответствующих работах [22, 26].

Применительно к исследуемому вопросу предлагается принять максимальное значение W за 100 относительных единиц (отн. ед.).

В теории уровень $W_{\text{нач}}$ должен составлять 100 отн. ед. Однако фактически это не так.

На практике установлено, что подавляющее большинство сдаваемых в эксплуатацию сооружений имеют *дефекты* в конструкциях, т. е. имеют место «...отклонения фактических свойств объекта от требований нормативных или проектно-конструкторских документов» [30].

Тогда встает вопрос об определении конкретного значения уровня $W_{\text{нач}}$.

Ответить на него реально, произведя определенный анализ, в котором возможно проследить уровни состояния сооружений на момент ввода их в эксплуатацию. С данной целью были изучены акты государственных и рабочих комиссий по приемке сооружений [26]. Причем наибольший интерес представляли те акты, в которых проставлялись оценки состояния по пятибалльной шкале.

Было выявлено, что подобные оценки присутствуют приблизительно в каждом втором акте, что соответствует ~50 % исследуемых сооружений. Всего было исследовано порядка 400 объектов.

Рис 3. Виды зависимостей состояния сооружения от времени эксплуатации: а — график, обратный функции износа (обратная экспоненциальная зависимость); б — степенная функция

В наличии имеется три варианта проставляемых оценок: «удовлетворительно» (3), «хорошо» (4) и «отлично» (5), причем в 92 % случаев выставлена оценка «хорошо».

Используя основные положения теории надежности [30], а также предложенные автором ранее параметрические значения коэффициента относительного остаточного срока службы при прогнозировании сроков службы [10, 19, 20, 26], за уровень исправного состояния сооружения $W_{испр}$ принимается уровень $W = 90$ отн. ед.

Тогда необходимо обозначить следующие допущения:

- оценке «отлично» соответствует уровень $W = 100$ отн. ед., т. е. на сооружении нет абсолютно никаких дефектов;
- оценке «удовлетворительно» соответствует уровень $W = 85$ отн. ед., т. е. в целом сооружение работоспособно, но в силу наличия дефектов его состояние нельзя охарактеризовать как исправное.

Следовательно, оценке «хорошо» будет соответствовать уровень, отн. ед.:

$$W = \frac{100 + 85}{2} = 92,5 = W_{нач}. \quad (4)$$

Ввиду того что каждый объект уникален по причине индивидуальности истории его проек-

тирования и строительства (и дальнейшей эксплуатации), соответственно и уровень $W_{нач}$ для каждого сооружения также будет индивидуален.

Для этого полученное дискретное значение заменим на интервал значений $W_{нач} = 90 \dots 95$ отн. ед.

Вышеприведенные расчеты и допущения можно привести к табличной форме (табл. 1).

Таким образом, оценки в актах приемочных комиссий позволяют установить начальный уровень состояния искусственного сооружения $W_{нач} = 90 \dots 95$ отн. ед.

Параметры функции прогнозирования технического состояния

Для получения положительных значений функции $W(t)$, лежащих в интервале $[W_{нач}; 0]$, значения коэффициента перехода α будут находиться в пределах $0,0003 \dots 0,0007$.

Решить задачу по определению коэффициента α возможно, исходя из уравнения

$$\alpha = \frac{W_{нач} - W(t)}{t^e}. \quad (5)$$

Изложенные в статье [20] основные положения методики прогнозирования сроков службы железобетонных мостов, учтенные наряду с материалами [4, 16, 23], позволяют установить уро-

Таблица 1

Уровни состояния сооружения в относительных единицах

Оценка по актам приемочных комиссий	Процентное количество данной оценки	Дискретное значение уровня состояния, отн. ед.	Интервал значений уровня состояния, отн. ед.
«3» — удовлетворительно	4 %	85	85–90
«4» — хорошо	92 %	92,5	90–95
«5» — отлично	4 %	100	95–100

Рис. 5. Коэффициент безопасности (индекс надежности)

вень в 50 отн. ед. в качестве граничного между категориями сооружения.

То есть при снижении уровня технического состояния до половины от возможного практически исчерпывается ресурс долговечности объекта, и все остальные потребительские свойства также. Ремонт объекта становится менее экономически целесообразен, нежели устройство нового сооружения. «При обобщенном показателе износа до 50 % сооружение считается еще ремонтируемым» [16].

В таком случае остается два неизвестных. Автором были выполнены вычисления при различных интервалах начального состояния —

[85, 100] и сроков службы объекта — [60, 75], а также их взаимных комбинациях. Путем статистического анализа указанного массива с обеспеченностью 0,99999 получено

$$\alpha = 5 \cdot 10^{-4}. \quad (6)$$

Тогда формула (3) приобретает вид:

$$W(t) = W_{\text{нач}} - 0,0005t^e. \quad (7)$$

Ранее автором [10, 19, 20] была предложена зависимость между категориями по критерию «долговечность» в относительных характеристиках оценки и остаточному сроку службы элемента сооружения в условиях Санкт-Петербурга (табл. 2).

Граничные значения между категориями назначены исходя из положений теории вероятностей и теории статистики, анализа работ, соответствующих теме исследования [4, 5, 7, 14, 16], и ряда наблюдений, выполненных самим автором [19, 20, 26]. Параметрические значения функции $W(t)$ представлены на рис. 4. Аналогичный подход зафиксирован и в работах [9, 27].

Методика прогнозирования технического состояния с учетом индекса надежности

Международный союз лабораторий по испытанию и исследованию материалов (RILEM) в качестве одного из критериев устанавливает соответствие между снижением какого-либо параметра и вероятностью такого снижения. Приняв в качестве параметра достижение того или иного уровня состояния сооружения, возможно учесть этот критерий в настоящей работе. То есть прогнозирование наступления более поздних событий должно вестись с большей обеспеченностью или надежностью.

Данный подход в целом отвечает современным исследованиям как в отечественной [1, 5, 21], так и зарубежной практике [31–33].

Таблица 2

Зависимость коэффициента относительного остаточного срока службы K_i от категории дефекта (повреждения) по критерию «долговечность»

Категория	0	1	2	3	4
K_i	$\geq 0,9$	0,7–0,9	0,5–0,7	0,25–0,5	$< 0,25$

Рис. 6. Квантили функции $W(t)$

Известно [26], что уровень надежности удобно задавать коэффициентом безопасности β (индекс надежности), который представляет собой число среднеквадратичных отклонений, укладывающихся в интервале $[0; m_z]$, где m_z — математическое ожидание исследуемой величины (в данном случае — срока службы сооружения) (рис. 5).

Приведенные зависимости (3) и (7) между состоянием сооружения W и его сроком службы t

в общем случае можно представить в виде:

$$W(t) = F(W_{нач}, t, \mu, [\text{система_коэффициентов}]), \quad (8)$$

где $W_{нач}$ — начальный уровень состояния сооружения; t — время (срок службы); μ — коэффициент деградации.

Из параметров функций случайными процессами формально являются все переменные (первые три параметра — $W_{нач}$, t , μ).

Таблица 3

Квантили функции $W(t)$

Критерий	Уровень состояния сооружения (в долях от максимальной — 100 отн. ед.), отн. ед.	Обеспеченность минимальной величины P	Индекс надежности β	Состояние сооружения, функциональные ограничения
1	25	0,99999	4,27	Достижение зоны предельных состояний, невозможность эксплуатации
2	50	0,9995	3,29	Частично работоспособное состояние, ограничения по потребительским свойствам, необходимость капитального ремонта или реконструкции
3	70	0,99	2,33	Работоспособное состояние, необходимо проведение ремонтных работ
4	90	0,9	1,28	Переход из исправного в неисправное состояние, одновременно работоспособное, работы по содержанию

Однако учитывая, что уровень $W_{нач}$ задается изначально, а время t в данном случае является временным интервалом (составляющим один год), очевидно, что коэффициент деградации μ будет пропорционален коэффициенту безопасности (индексу надежности) и соответственно обеспеченности исследуемой величины:

$$\beta \sim \mu. \quad (9)$$

Автором на основе фактических характеристик объектов исследования (парка железобетонных мостов и путепроводов Санкт-Петербурга) предлагаются [26] четыре **критерия оценки** остаточного срока службы сооружения (иными словами, его прогнозирования), представленные в виде точек пересечения заданных уровней и квантилей состояния сооружения (табл. 3).

Определение соответствующих уровней состояния по приведенным критериям (и соответственно прогнозирование срока службы до достижения заданного уровня и возможность планирования содержания) отражено на рис. 6.

Достоверность предлагаемых критериев была с достаточной долей вероятности подтверждена автором в рамках проведенных ранее исследований и апробаций [18–22, 26]. Достаточно сказать, что автором проводился доскональный анализ выполненных обследований железобетонных мостовых сооружений Санкт-Петербурга (более 300 объектов), строились статистические ряды для различных объектов.

Выводы

Имея в распоряжении сведения о текущем техническом состоянии петербургских железобетонных мостовых сооружений, имеющих способы и методы оценки технического состояния и его возможном прогнозировании, автором предложен соответствующий алгоритм. Данный инженерный инструмент представляет собой методику прогнозирования технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений мегаполиса.

Основой указанной методики являются следующие положения [26]:

- вероятностно-статистический подход к оценке начального, существующего и прогнозируемого состояния объекта исследования;
- использование основных понятий теории надежности и теории вероятности при описании

«поведения» сооружения во времени, а также деградационных процессов, происходящих в нем;

- применение в качестве исходных данных основных проектных (или начальных) параметров объекта(-ов) исследования, срока службы мостового сооружения и статистических характеристик негативных (деградационных) процессов за весь период эксплуатации;
- соответствие между снижением уровня состояния сооружения по какому-либо параметру и вероятностью такого снижения, которое основывается на критериях *RILEM*.

Полученные автором определенные зависимости в области прогнозирования технического состояния железобетонных мостовых сооружений, находящихся в сложных условиях эксплуатации Санкт-Петербурга, являются частью большой работы по исследованию элементов управления техническим состоянием искусственных сооружений мегаполисов.

Библиографический список

1. Иосилевский Л. И. Практические методы управления надежностью железобетонных мостов. М.: Инженер, 2001. 296 с.
2. Лантух-Лященко А. И. В поисках концепции управления долговечностью элементов железобетонных автодорожных мостов // Электронный архив журнала «Вестник Национального транспортного университета». Вып. 26. Часть 1. 2012.
3. Каранетов Э. С., Шестовицкий Д. А. Проблема долговечности железобетонных мостов // Новые технологии в мостостроении (от прошлого к будущему): сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. 2015 г. СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. С. 111–116.
4. Бокарев С. А. Управление техническим состоянием искусственных сооружений железных дорог России на основе новых информационных технологий. Новосибирск: МПС РФ, СГУПС, 2002. 276 с.
5. Васильев А. И. Методология системного подхода к нормированию и натурным исследованиям автодорожных мостов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: ОАО «ЦНИИС», 2003. 65 с.
6. Васильев А. И. Потребительские свойства мостов // Вопросы нормирования потребительских свойств мостов. М.: ОАО «ЦНИИС», 2002. С. 8–23.
7. Васильев А. И. Состояние и проблемы нормирования мостов // Сб. докладов Всероссийской конф. «Актуальные проблемы проектирования автомобильных дорог и искусственных сооружений». СПб., 2008. С. 30–32.

8. Виноградский Д. Ю., Руденко Ю. Д., Шкуратовский А. А. Эксплуатация и долговечность мостов. Киев.: Будівельник, 1985. 104 с.
9. Добромыслов А. Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам: справочное пособие. М.: АСВ, 2006. 72 с.
10. Карпетов Э. С., Белый А. А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных мостов и путепроводов Санкт-Петербурга // Журнал современных строительных технологий «Красная линия». Выпуск «Дороги». 2009. № 39/8. С. 48–51.
11. Матвеев В. К., Блохин В. К., Крутиков О. В. Современные методы обследования автодорожных мостов, опыт Т.К.М. // Сб. трудов МИИТа «К 100-летию института». М., 1998. С. 141–163.
12. Нечаев Ю. П. Долговечность искусственных сооружений // Эксплуатационная надежность искусственных сооружений. М.: Транспорт, 1989. С. 67–72.
13. Пухонто Л. М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений: (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен). М.: АСВ, 2004. 424 с.
14. Рузов А. М. Эксплуатация мостового парка. М.: Академия, 2007. 176 с.
15. Скоробогатов С. М. Ускоренное обследование массивных и протяженных железнодорожных сооружений и конструкций // Транспорт Урала. 2004. № 1. С. 60–68.
16. Шестериков В. И. Оценка и прогнозирование состояния мостов на автомобильных дорогах в системе управления их эксплуатацией: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: ГП «Росдорнии», 2004. 48 с.
17. Steenbergen R., Sýkora M., Diamantidis D., Holický M., Vrouwenvelder T. Economic and human safety reliability levels for existing structures // Structural Concrete. Volume 16, Issue 3 // Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, September 2015. Pp. 323–333.
18. Белый А. А. Об эксплуатации железобетонных мостов и путепроводов Санкт-Петербурга // Сб. материалов 61-й Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства». Ч. III. СПб.: СПбГАСУ. 2008. С. 12–19.
19. Белый А. А. Способ оценки технического состояния железобетонных мостов и путепроводов Санкт-Петербурга // Транспортное строительство. 2009. № 6. С. 10–13.
20. Белый А. А. Основные положения методики прогнозирования сроков службы эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений // Наука и бизнес: пути развития. 2016. № 10 (64). С. 9–20.
21. Карпетов Э. С., Белый А. А. Эксплуатационное состояние железобетонных мостовых сооружений Санкт-Петербурга // Сб. трудов «125 лет в мостостроении». СПб.: ИПГУПС, 2008. С. 62–68.
22. Карпетов Э. С., Белый А. А. Методы оценки технико-эксплуатационных показателей железобетонных мостовых сооружений Санкт-Петербурга // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2009. № 2. С. 177–187.
23. Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов. М.: Министерство транспорта Российской Федерации, 2002. 146 с.
24. Сырков А. В. Критерии технического состояния и количественная оценка износа мостовых конструкций // Сб. докладов Междунар. науч.-практ. семинара «Прогрессивные технические решения и мониторинг в строительстве, ремонте и содержании мостовых сооружений». Нижний Новгород, 2007.
25. Сырков А. В. Развитие методов количественной оценки деградации мостовых сооружений // Сб. докладов 65-й науч. конф. профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. СПб.: СПбГАСУ, 2008. С. 75–79.
26. Белый А. А. Методика оценки и прогнозирования технического состояния городских железобетонных мостовых сооружений: дис. ... канд. техн. наук. М.: Моск. гос. автомобил.-дорож. ин-т (техн. ун-т), 2009. 253 с.
27. Крахмальня М. П., Евтушенко С. И., Крахмальный Т. А. К вопросу об остаточном ресурсе длительно эксплуатируемых мостов через водопроводящие каналы // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр.-во и архит. 2014. Вып. 35(54). С. 166–170.
28. Горбеев Б. С. Мировые константы «пи» и «е» в основных законах физики и физиологии // Наука и жизнь. 2004. № 2.
29. Руководство по оценке транспортно-эксплуатационного состояния мостовых конструкций ОДН 218.017–2003. М.: Минтранс РФ, 2004. 48 с.
30. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 37 с.
31. Лантух-Лященко А. И. Концепция надежности в Еврокоде // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 36. № 6. Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. С. 79–88.
32. EN 1990-2001. Eurocode: Basis of Structural Design. Brussels: CEN, 2001. 89 p.
33. Sýkora M., Holický M., Marková J. Verification of existing reinforced concrete bridges using the semi-probabilistic approach // Engineering Structures. 2013. Vol. 56. Pp. 1419–1426. <https://www.journals.elsevier.com/engineering-structures>

References

1. Iosilevskiy L. I. *Prakticheskie metody upravleniya nadezhnost'yu zhelezobetonnykh mostov* [Practical methods of managing the reinforced concrete bridges' reliability]. Moscow, Inzhener Publ., 2001, 296 p.
2. Lantukh-Lyashchenko A. I. *V poiskakh kontseptsii upravleniya dolgovechnost'yu ehlementov zhelezobetonnykh avtodorozhnykh mostov* [In search of the concept of management of reinforced concrete road bridge elements durability]. *Ehlektronnyy arkhiv zhurnala «Vestnik Natsional'nogo transportnogo universiteta» – Electronic archive of the "Bulletin of National Transport University"*, iss. 26, pt. 1, 2012.
3. Karapetov Eh. S., Shestovitskiy D. A. *Problema dolgovechnosti zhelezobetonnykh mostov* [The problem of durability of reinforced concrete bridges]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Novye tekhnologii v mostostroenii (ot proshlogo k budushchemu)»* [Proc. of the International scientific and technical conference "New technologies in bridge building (from the past to the future)"]. Saint-Petersburg, FGBOU VPO PGUPS Publ., 2015, pp. 111–116.
4. Bokarev S. A. *Upravlenie tekhnicheskimi sostoyaniem iskusstvennykh sooruzheniy zheleznykh dorog Rossii na osnove novykh informatsionnykh tekhnologiy* [Management of technical condition of artificial constructions of the railroads of Russia on the basis of new information technologies]. Novosibirsk, SGUPS Publ., 2002, 276 p.
5. Vasil'ev A. I. *Metodologiya sistemnogo podkhoda k normirovaniyu i naturnym issledovaniyam avtodorozhnykh mostov. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk* [Methodology of system approach to rationing and natural researches of road bridges. Author's thesis of Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, OAO TsNIIS Publ., 2003, 65 p.
6. Vasil'ev A. I. *Potrebitel'skie svoystva mostov* [Consumer properties of bridges]. *Voprosy normirovaniya potrebitel'skikh svoystv mostov* [Issues of rationing of consumer properties of bridges]. Moscow, OAO TsNIIS Publ., 2002, pp. 8–23.
7. Vasil'ev A. I. *Sostoyanie i problemy normirovaniya mostov* [The condition and problems of rationing of bridges]. *Trudy Vserossiyskoy konf. «Aktual'nye problemy proektirovaniya avtomobil'nykh dorog i iskusstvennykh sooruzheniy»* [Proc. of the All-Russia conf. "Urgent problems of design of highways and artificial constructions"]. Saint-Petersburg, 2008, pp. 30–32.
8. Vinogradskiy D. Yu., Rudenko Yu. D., Shkuratovskiy A. A. *Ehkspluatatsiya i dolgovechnost' mostov* [Operation and durability of bridges]. Kiev, Budivel'nik Publ., 1985, 104 p.
9. Dobromyslov A. N. *Otsenka nadezhnosti zdaniy i sooruzheniy po vneshnim priznakam. Spravochnoe posobie* [Assessment of reliability of buildings and constructions on external signs. Reference book]. Moscow, ASV Publ., 2006, 72 p.
10. Karapetov Eh. S., Belyy A. A. *Otsenka i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh mostov i puteprovodov Sankt-Peterburga* [Assessment and forecasting of technical condition of reinforced concrete bridges and overpasses of St. Petersburg]. *Zhurnal sovremennykh stroitel'nykh tekhnologiy «Krasnaya liniya» – Journal of modern construction technologies "Red Line"*, 2009, no. 39/8, pp. 48–51.
11. Matveev V. K., Blokhin V. K., Krutikov O. V. *Sovremennye metody obsledovaniya avtodorozhnykh mostov, opyt T.K.M.* [Modern methods of inspection of road bridges, experience of T.K.M.]. *Trudy MIITa «K 100-letiyu instituta» – Proc. of the MIIT "To the 100-th anniversary of the Institute"*, Moscow, 1998, pp. 141–163.
12. Nechaev Yu. P. *Dolgovechnost' iskusstvennykh sooruzheniy* [Durability of artificial constructions]. *Ehkspluatatsionnaya nadezhnost' iskusstvennykh sooruzheniy* [Operational reliability of artificial constructions]. Moscow, Transport Publ., 1989, pp. 67–72.
13. Pukhonto L. M. *Dolgovechnost' zhelezobetonnykh konstruksiy inzhenernykh sooruzheniy (silosov, bunkerov, rezervuarov, vodonapornykh bashen, podpornykh sten)* [Durability of reinforced concrete designs of engineering constructions (silos, bunkers, tanks, water towers, retaining walls)]. Moscow, ASV Publ., 2004, 424 p.
14. Ruzov A. M. *Ehkspluatatsiya mostovogo parka* [Operation of the bridge park]. Moscow, Akademiya Publ., 2007, 176 p.
15. Skorobogatov S. M. *Uskorennoe obsledovanie massivnykh i protyazhennykh zheleznodorozhnykh sooruzheniy i konstruksiy* [Accelerated inspection of massive and extended railway constructions and designs]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2004, no. 1, pp. 60–68.
16. Shesterikov V. I. *Otsenka i prognozirovaniye sostoyaniya mostov na avtomobil'nykh dorogakh v sisteme upravleniya ikh ehkspluatatsiyey. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk* [Assessment and forecasting of a condition of bridges on highways in a control system of their operation. Author's thesis of Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, Rosdornii Publ., 2004, 48 p.
17. Steenbergen R., Sýkora M., Diamantidis D., Holický M., Vrouwenvelder T. *Economic and human safety reliability levels for existing structures. Structural Concrete*, vol. 16, iss. 3, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, September 2015, pp. 323–333.
18. Belyy A. A. *Ob ehkspluatatsii zhelezobetonnykh mostov i puteprovodov Sankt-Peterburga* [About operation of reinforced concrete bridges and overpasses of St. Petersburg]. *Trudy 61-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. molodykh uchenykh «Aktual'nye problemy sovremennogo stroitel'stva»* [Proc. of the 61-st Int. sci.-tech. conf. of young

scientists "Urgent problems of modern construction"]. Pt. III. Saint-Petersburg, SPSUACE, 2008, pp. 12–19.

19. Belyy A. A. *Spособ otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh mostov i puteprovodov Sankt-Peterburga* [A technique of assessing the technical condition of reinforced concrete bridges and overpasses in St. Petersburg]. *Transportnoe stroitel'stvo – Transport construction*, 2009, no. 6, pp. 10–13.

20. Belyy A. A. *Osnovnye polozheniya metodiki prognozirovaniya srokov sluzhby ehkspluatiruemykh zhelezobetonnykh mostovykh sooruzheniy* [Basic provisions of the technique of forecasting the service life of the operated reinforced concrete bridge constructions]. *Nauka i biznes: puti razvitiya – Science and business: ways of development*, 2016, no. 10 (64), pp. 9–20.

21. Karapetov Eh. S., Belyy A. A. *Ehkspluatatsionnoe sostoyanie zhelezobetonnykh mostovykh sooruzheniy Sankt-Peterburga* [Operational condition of reinforced concrete bridge constructions of St. Petersburg]. Coll. of sci. works "125 years in bridge building". Saint-Petersburg, IPGUPS Publ., 2008, pp. 62–68.

22. Karapetov Eh. S., Belyy A. A. *Metody otsenki tekhniko-ehkspluatatsionnykh pokazateley zhelezobetonnykh mostovykh sooruzheniy Sankt-Peterburga* [Methods of assessing the technical and operational indicators of reinforced concrete bridge constructions of St. Petersburg]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya – News of the St. Petersburg transport university*, 2009, no. 2, pp. 177–187.

23. *Metodika raschetnogo prognozirovaniya sroka sluzhby zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy avtodorozhnykh mostov* [Technique of calculation forecasting of service life of reinforced concrete superstructures of road bridges]. Moscow, Ministry of Transport of the Russian Federation, 2002, 146 p.

24. Syrkov A. V. *Kriterii tekhnicheskogo sostoyaniya i kolichestvennaya otsenka iznosa mostovykh konstruktсий* [Criteria of technical condition and quantitative assessment of wear of bridge designs]. *Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. seminarov «Progressivnye tekhnicheskie resheniya i monitoring v stroitel'stve, remonte i soderzhanii mostovykh sooruzheniy»* [Proc. of the Int. sci.-pract. seminar "Progressive technical solutions and monitoring in construction, repair and maintenance of bridge constructions"]. Nizhniy Novgorod, 2007.

25. Syrkov A. V. *Razvitie metodov kolichestvennoy otsenki degradatsii mostovykh sooruzheniy* [Development

of methods of a quantitative assessment of degradation of bridge constructions]. *Trudy 65-y nauch. konf. professorov, prepodavateley, nauchnykh rabotnikov, inzhenerov i aspirantov universiteta* [Proc. of the 65th sci. conf. of professors, teachers, scientists, engineers and graduate students of university]. Saint-Petersburg, SPSUACE, 2008, pp. 75–79.

26. Belyy A. A. *Metodika otsenki i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya gorodskikh zhelezobetonnykh mostovykh sooruzheniy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Method of assessing and forecasting the technical condition of the city reinforced concrete bridge constructions. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, MADI Publ., 2009, 253 p.

27. Krakhmal'naya M. P., Evtushenko S. I., Krakhmal'nyy T. A. *K voprosu ob ostatochnom resurse dlitel'no ehkspluatiruemykh mostov cherez vodoprovodyashchie kanaly* [To the issue of a residual resource of long operated bridges via the water supply channels]. *VSUACE Bulletin*, 2014, no. 35(54), pp. 166–170.

28. Gorobets B. S. *Mirovye konstanty «pi» i «e» v osnovnykh zakonakh fiziki i fiziologii* [The world constants "pi" and "e" in fundamental laws of physics and physiology]. *Nauka i zhizn' – Science and life*, 2004, no. 2.

29. *Rukovodstvo po otsenke transportno-ehkspluatatsionnogo sostoyaniya mostovykh konstruktсий ODN 218.017–2003* [Guidance to the assessment of transport and operational condition of bridge designs of ODN 218.017–2003]. Moscow, Mintrans RF Publ., 2004, 48 p.

30. GOST 27.002–89. *Nadezhnost' v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya* [GOST 27.002–89. Reliability in the equipment. Basic concepts. Terms and definitions]. Moscow, Standards Publishing House, 1990, 37 p.

31. Lantukh-Lyashchenko A. I. *Kontseptsiya nadezhnosti v Evrokode* [The concept of reliability in Eurocode]. *Mosti ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktika*. Zb. no. 6. Dnipropetrovsk, Vid-vo Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad., 2014, pp. 79–88.

32. EN 1990-2001. *Eurocode: Basis of Structural Design*. Brussels: CEN, 2001, 89 p.

33. Sýkora M., Holický M., Marková J. Verification of existing reinforced concrete bridges using the semi-probabilistic approach. *Engineering Structures*, 2013, vol. 56, pp. 1419–1426. Available at: <https://www.journals.elsevier.com/engineering-structures>