

Научная статья

УДК 624.21

doi:10.52170/1815-9265_2026_81_97

Оценка долговечности и остаточного срока службы эксплуатируемых опор железнодорожных мостов

Стефан Васильевич Ефимов¹, Кирилл Олегович Жунев², Иван Владимирович Чаплин^{3✉},
Иван Олегович Шеин⁴, Анатолий Михайлович Попов⁵

1, 2, 3, 4, 5 Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ esvmt@mail.ru

² junev.kirill@yandex.ru

³ chaplin@sibgups.ru✉

⁴ pauk_iv@mail.ru

⁵ termech@stu.ru

Аннотация. В статье рассмотрены теоретические и прикладные аспекты оценки долговечности и остаточного срока службы опор эксплуатируемых железнодорожных мостов. Актуальность темы обусловлена сочетанием нескольких факторов: значительным сроком эксплуатации железнодорожных мостовых сооружений, накоплением и развитием дефектов в основных несущих конструкциях, необходимостью пропуска тяжеловесных поездов в условиях высокой интенсивности движения, а также ограниченностью ресурсов на капитальный ремонт и реконструкцию.

В статье рассмотрена эволюция подходов к оценке долговечности: от эмпирических и детерминированных к стохастическим (вероятностным) моделям. Выполнен ретроспективный анализ отраслевой нормативной базы на длительном временном интервале с обобщением основных подходов и методик, характерных для разных периодов эксплуатации сооружений. Показано, что объективный прогноз оценки остаточного ресурса должен строиться на базе исторических данных по эксплуатации сооружений и результатов периодических наблюдений за появлением и развитием дефектов, оказывающих влияние на долговечность.

Приведен анализ состояния русловых опор железнодорожных мостов, выполненный на основе статистических данных по наличию дефектности. На основании полученных результатов построены графики вероятности появления в русловых опорах мостов дефектов, влияющих на долговечность, в зависимости от сроков эксплуатации конструкций.

Приведены графики плотности распределения вероятностей, по которым определены обеспеченные сроки эксплуатации опор до появления конкретного дефекта. Установлена применимость использования метода для прогнозирования долговечности и остаточного ресурса опор при наличии соответствующей статистики по истории их эксплуатации.

Отмечено, что дальнейшие исследования для определения долговечности конструкций должны основываться на полноценных данных об истории эксплуатации элементов мостового сооружения. Полученные в рамках данной работы материалы составляют базис для прогнозирования параметров долговечности опор мостовых сооружений и оценки их остаточного срока службы.

Ключевые слова: мост, железнодорожный мост, опоры моста, долговечность, срок службы, прогнозирование, техническое состояние, диагностика и наблюдение, элементы мостов, надежность, информационные системы

Для цитирования: Оценка долговечности и остаточного срока службы эксплуатируемых опор железнодорожных мостов / С. В. Ефимов, К. О. Жунев, И. В. Чаплин, И. О. Шеин, А. М. Попов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 4 (81), спецвыпуск. С. 97–108. DOI 10.52170/1815-9265_2026_81_97.

Original article

Assessment of durability and residual service life of operational supports of railway bridges

Stefan V. Efimov¹, Kirill O. Zhunev², Ivan V. Chaplin^{3✉}, Ivan O. Shein⁴, Anatoliy M. Popov⁵

1, 2, 3, 4, 5 Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ esvmt@mail.ru

² junev.kirill@yandex.ru

³ chaplin@sibgups.ru✉

⁴ pauk_iv@mail.ru

⁵ termech@stu.ru

Abstract. This article examines the theoretical and applied aspects of assessing the durability and remaining service life of supports on operational railway bridges. The relevance of this topic stems from a combination of several factors: the significant service life of railway bridge structures, the accumulation and development of defects in the main supporting structures, the need to accommodate heavy trains under high traffic conditions, and limited resources for major repairs and reconstruction.

This article examines the evolution of approaches to durability assessment: from empirical and deterministic to stochastic (probabilistic) models. A retrospective analysis of the industry regulatory framework over a long period of time is performed, summarizing the main approaches and methods characteristic of different periods of structure operation. It is shown that an objective forecast for assessing the remaining service life should be based on historical data on the operation of the structure and the results of periodic observations of the occurrence and development of defects affecting durability.

This article presents an analysis of the condition of railway bridge channel piers based on statistical data on the presence of defects. Based on the obtained results, graphs of the probability of occurrence of defects in bridge channel piers affecting their service life are constructed depending on the service life of the structures.

Probability density plots are presented, which are used to determine the guaranteed service life of the piers before the occurrence of a specific defect. The applicability of this method for predicting the service life and remaining life of piers is established given the availability of relevant statistics on the service history of similar piers.

It is noted that further research to determine the service life of structures should be based on comprehensive data on the service history of bridge structure components. The data obtained in this study form the basis for predicting the durability parameters of bridge piers and estimating their remaining service life.

Keywords: bridge, railway bridge, bridge supports, durability, service life, forecasting, technical condition, diagnostics and monitoring, bridge components, reliability, information systems

For citation: Efimov S. V., Zhunev K. O., Chaplin I. V., Shein I. O., Popov A. M. Assessment of durability and residual service life of operational supports of railway bridges. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(81):97–108. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_81_97.

Введение

Во всем мире железные дороги используются для перевозки людей и грузов благодаря своим экономическим, экологическим преимуществам и безопасности и считаются одной из наиболее стабильных транспортных систем. Развитие железнодорожной сети невозможно выполнять только за счет строительства новых объектов из-за значительных прямых затрат. Необходимо продление срока службы существующих искусственных сооружений с объективной оценкой их технического состояния и остаточного срока службы. В этом контексте важное значение имеют мостовые сооружения, которых на сети ОАО «РЖД» в настоящее время эксплуатируется около 30 000 согласно сведениям базы данных.

Искусственные сооружения на железных дорогах представляют собой сложные системы, состоящие из множества элементов. У каждого элемента свое конструктивное исполнение и назначение. Каждый элемент подвержен, как правило, воздействию нескольких внешних факторов и может иметь разнообразные дефекты. Для оценки технического состояния эксплуатируемых конструкций существует подход, заключающийся в использовании конкретных показателей надежности (безотказности, долговечности, грузоподъемности, ремонтпригодности), характеризующих способность отдельного элемента и сооружения в целом выполнять

требуемые функции. В данной работе рассмотрена ретроспектива определения такого показателя надежности, как долговечность, а также сопутствующего ему показателя остаточного срока службы мостовых сооружений.

В последние годы определение остаточного ресурса искусственных сооружений является все более актуальной процедурой в системе эксплуатации. На сегодняшний день в мировой практике эта задача однозначно не решена, существуют различные подходы и способы определения остаточного срока службы искусственных сооружений [1–3]. В данной работе приведен анализ способов и подходов в части определения долговечности конструкций мостовых сооружений из сохранившихся технических документов.

Современные исследования, включая разработки коллектива СибНИИ мостов СГУПС по железнодорожным сооружениям, показывают, что корректная оценка остаточного срока службы требует совместного учета данных широко используемых детерминированных моделей, механизма деградации материалов, режима фактического нагружения конструкций, особенностей эксплуатации, полноты и частоты инспекционного контроля, а также прогнозных моделей, основанных на стохастическом (вероятностном) подходе [4–12]. Остаточный срок службы несущих конструкций сооружения, как многокритериальный параметр, требует необходимости увязки и сопоставления разных ме-

тодик его оценки с целью повышения достоверности получаемых результатов.

Цель статьи – повышение объективности оценки остаточного срока службы конструкций опор железнодорожных мостов. Основные задачи: исследование теоретических и практических аспектов оценки долговечности и остаточного срока службы элементов эксплуатируемых железнодорожных мостов, исторический обзор и анализ существующих подходов по определению долговечности, систематизация действующей технической и нормативной базы, обобщение результатов исследований коллектива СибНИИ мостов СГУПС в части оценки долговечности.

Объектом исследования являются русловые опоры железнодорожных мостов. Предмет исследования составляют долговечность и остаточный срок службы опор эксплуатируемых железнодорожных мостовых сооружений.

Одним из первых документов, который стал применяться для оценки состояния и остаточного срока службы мостовых сооружений, были методические указания по оценке технического состояния и определению износа искусственных сооружений железных дорог, введенные в действие в 1971 г. Указания были разработаны ВНИИЖТ на основании распоряжения МПС и являлись руководством при переоценке искусственных сооружений, проводимой в соответствии с Постановлением Совета Министров СССР № 252 от 7 апреля 1969 г. Было принято решение об инвентаризации ИССО в части систематизации сведений об их техническом состоянии и степени износа. Под решение этой задачи была разработана методика ранжирования сооружений и отнесения их к одной из предусмотренных этой методикой категорий.

Для более тонкого ранжирования искусственных сооружений было введено понятие «износа». Износ выражался в процентах и определялся сочетанием присвоенной категории неисправности и фактического срока службы основных конструктивных элементов. Износ более 60 % подразумевал необходимость переустройства конструкций. Однако существует большое разнообразие конструктивного исполнения элементов, которое не учитывалось в данном подходе, но оказывало влияние на скорость износа. Поэтому такая попытка практического применения методики оценки износа элементов

искусственных сооружений себя в достаточной степени не оправдала и фактически не применялась.

В 1991 г. отделом эксплуатационных обследований и технологии ремонта инженерных сооружений ПКТБ Главного управления пути МПС СССР было разработано положение по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах СССР. Основной целью положения было стимулирование улучшения содержания и состояния искусственных сооружений на сети железных дорог на основании внедрения балльной оценки, обеспечивающей возможность сравнения и ранжирования показателей деятельности мостовой бригады и дистанций пути. Балльная оценка определялась в соответствии с перечнем дефектов, которые были зафиксированы на сооружении и снижали показатели надежности конструкций.

Однако в данном положении никак не регламентировалось разделение дефектов по их влиянию на долговечность конструкций. Изложенный в положении перечень дефектов элементов искусственных сооружений устанавливал их влияние на надежность в целом, без деления на конкретные показатели. Соответственно, при равных значениях балльных оценок не было никакого различия между сооружениями, где эти оценки в одном случае определялись дефектами, оказывающими преимущественное влияние на долговечность основных несущих конструкций, а в другом случае дефектами, непосредственно влияющими на безопасность движения.

В 2005 г. была введена в действие инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах, разработанная коллективом сотрудников СГУПС под руководством профессора С. А. Бокарева. В данной инструкции существенное развитие получил каталог дефектов, который стал более структурированным и детальным как в части декомпозиции и представления типа искусственного сооружения по его конструктивному исполнению, так и в части описания самих дефектов, а также качественных и количественных параметров степеней их развития в увязке с конкретным конструктивным исполнением. Кроме того, категорирование дефектов в зависимости от степени их развития, в отличие от положения 1991 г., было произведено в раздельной увязке с влиянием на безопасность, грузоподъемность,

долговечность и ремонтпригодность. Помимо раздельного категорирования было введено понятие «обобщенной» категории дефекта, значение которой принималось максимальным из категорий по безопасности, долговечности и грузоподъемности. Оценка долговечности сооружения осуществлялась путем установления наиболее значимого дефекта по долговечности. Методики и подходы в части определения остаточного срока службы и прогнозирования появления/развития дефектов в данной инструкции не были предусмотрены.

В 2019 г. инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений была актуализирована также коллективом сотрудников СГУПС и действовала на сети железных дорог ОАО «РЖД» пять лет.

Данная инструкция была переработана в развитие предыдущего документа от 2005 г. Инструкция содержала ряд нововведений, но сам подход к оценке состояния сооружений значимых изменений не получил. В инструкцию были включены нормативные (проектные) сроки службы элементов искусственных сооружений, а также показатель скорости деградации конструкций сооружения, которые легли в основу новой разработанной методики оценки остаточного срока службы искусственных сооружений. Методика была разработана как дополнительный показатель, позволяющий ранжировать сооружения и выбирать наихудшие при реализации технической политики в отношении искусственных сооружений. В основу методики был заложен детерминированный подход, суть которого заключалась в соотношении наибольшей категории дефекта по долговечности к доле нормативного (проектного) срока. По этому соотношению прогнозировали остаточный срок службы каждой основной конструкции искусственного сооружения.

В методике были предусмотрены правила определения прогнозируемого срока службы искусственных сооружений от момента постройки до полного износа (коэффициент 1,0) или до следующего капитального ремонта (коэффициент 0,8). Однако получаемые результаты расчетов остаточного срока службы, как правило, не соответствовали фактическому состоянию сооружения за счет невозможности учета различных факторов и практически не применялись.

В инструкцию было включено отдельное приложение, в котором изложена «вероятностная оценка технического состояния сооружения», основанная на Марковских процессах с дискретным временем [13, 14]. Применение методики вероятностной оценки требует накопления значительного массива данных за наблюдением искусственных сооружений, которые составляют основу для методики. Фактически на период действия инструкции методика не нашла практического применения в связи с отсутствием исходных данных в необходимом объеме и сложностью автоматизации алгоритма расчета. Следует отметить, что изложенная методика вероятностной оценки предусматривала применение в качестве исходных данных показателей детерминированной модели, характеризующих фактическое техническое состояние сооружения, включая балльную оценку по долговечности и другим показателям надежности.

В 2024 г. распоряжением ОАО «РЖД» № 3223/р была введена в действие новая инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений. Инструкция была существенно переработана коллективом сотрудников СГУПС относительно предыдущей версии и в настоящий момент является действующей. Методика оценки долговечности и определения остаточного срока службы была доработана только в части увеличения различных количественных показателей, но осталась в рамках детерминированной модели.

Долговечность сооружения в целом, согласно инструкции, определяется состоянием основных конструкций. Неосновные конструкции оказывают на долговечность сооружения опосредованное влияние. Поскольку долговечность каждой отдельной конструкции и каждого отдельного элемента может быть различна, то при ее оценке рассматривают несколько показателей, характеризующих с позиции долговечности состояние отдельных конструкций моста и всего сооружения в целом. Увеличение набора показателей по долговечности сооружения позволило осуществлять более гибкое ранжирование сооружений, имеющих похожий набор дефектов в элементах и подобное конструктивное исполнение.

Проведенный анализ отраслевых документов показал, что в каждом новом или актуализируемом нормативе разработчиками предпринимались попытки приблизиться к более объективным и математически обоснованным результатам в части оценки и прогнозирования остаточного срока службы сооружений. Однако на сегодняшний день данный вопрос требует более детального изучения с анализом накопленного объема статистических данных по истории эксплуатации искусственных сооружений. Основная сложность заключается в сборе таких данных, поскольку за длительный срок эксплуатации сооружений одна часть информации оказалась утерянной по разным причинам, другая часть находится в бумажном виде (технические отчеты по результатам обследований) в различных архивах железных дорог, доступ к которым в научно-исследовательских целях получить практически невозможно.

Методика исследования

Искусственные сооружения на сети железных дорог эксплуатируются в условиях различных воздействий со стороны внешней среды, которые оказывают влияние на их способность выполнять свои функции. Существенные дефекты искусственных сооружений высоких категорий по долговечности (3 и 4) возникают преимущественно из-за воздействий со стороны внешних факторов, а вероятность их возникновения зависит от наличия и состава иных дефектов в несущих конструкциях. Основные воздействия – это временная поездная нагрузка и климатические (природные) воздействия. Они имеют разный характер. Распределение вероятности появления дефектов, вызванных природным фактором, не зависит от воздействия подвижной нагрузки. Поэтому в таких случаях оперируют не понятием наработки (усталостная долговечность), выраженной в величине пропущенного трафика по сооружению, а определением единиц времени (годы, дни и т. д.).

Искусственные сооружения – высоконадежные системы, поэтому сбор статистики появления существенных дефектов с 3 или 4 категориями по долговечности в достаточном для формирования выборки объеме может занять много времени. Поэтому на начальном этапе прогноза долговечности искусственных сооружений оценка может быть только приближенной, но в

ходе эксплуатации будет постепенно уточняться по мере накопления информации о реализовавшихся событиях в виде дефектов высокой категории по долговечности. Учет и обобщение таких данных для возможности их последующей статистической обработки следует вести исключительно в информационно-аналитической системе, схожей с ранее используемой АСУ ИССО, но предусматривающей более широкий функционал.

Стохастические расчеты искусственных сооружений показывают, что, например, проектная вероятность безотказной работы при воздействии расчетных временных и постоянных нагрузок в течение расчетного срока службы (~80 лет) составляет около 0,999 при условии их исправного состояния [15, 16]. Поэтому статистическая оценка показателей надежности (в частности долговечности) затруднена по причине небольшого объема выборок, относительно длительного периода эксплуатации между возникновениями существенных дефектов. Кроме того, нередко информация об истории возникновения и развития опасных дефектов на сооружении, особенно до появления информационных систем в конце 1990-х гг., отсутствует. За период, предшествующий внедрению информационных систем, она может быть взята только из книг ИССО и отчетов по периодическим обследованиям, которые содержат далеко не полную информацию и зачастую утеряны, особенно для малых искусственных сооружений. Из-за нехватки таких статистических данных вероятностная оценка может оказаться некорректной или вообще невозможной. В таких случаях состояние конструкций искусственных сооружений возможно оценивать приближенно с учетом информации об имеющихся неисправностях, а по мере наблюдений за эксплуатируемыми сооружениями уточнять вероятностные оценки, опираясь на возрастающий массив статистики.

Информацию для определения показателей надежности, в том числе долговечности, дает распределение срока эксплуатации, выраженного в годах, до появления конкретного дефекта. Вид функции распределения для различных элементов сооружения в общем случае индивидуален, а параметры распределения зависят как от свойств самого элемента, так и от условий, в которых он эксплуатируется. На состояние мостовых сооружений оказывает влия-

ние множество случайных факторов – случайными являются прочность материала (арматуры, бетона, бутобетона, стали и др.), геометрические характеристики (размеры и взаимное расположение элементов), интенсивность нагрузок (временных и постоянных) и другие величины. Учитывая это, а также то, что время эксплуатации сооружения (t) до появления дефекта в элементе не может быть отрицательным, можно принять для описания срока службы конструкции один из экстремальных законов распределения (распределение Вейбулла – Гнеденко (далее – распределение Вейбулла) с тремя параметрами), который имеет вид [17]:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}, \quad (1)$$

при условии, что $t \geq \gamma$.

Функция плотности вероятности этого распределения

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}, \quad (2)$$

Функция плотности вероятности закона имеет три параметра:

1) β – параметр формы (определяет характер изменения интенсивности отказов: $\beta < 1$ – интенсивность отказов убывает; $\beta > 1$ – интенсивность отказов возрастает; для эксплуатируемых элементов мостов, как правило, $\beta > 1$);

2) η – параметр масштаба («характерный» срок службы; величина срока службы, по истечении которого дефект возникает у примерно 63 % объектов);

3) γ – срок эксплуатации без возникновения отказа (параметр сдвига – интервал времени, в котором отказ статистически не ожидается; для эксплуатируемых элементов мостов, как правило, $\gamma = 0$).

Функцию частоты отказов $\lambda(t)$ распределения Вейбулла определяют по формуле

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}. \quad (3)$$

Функцию надежности $R(t)$ распределения Вейбулла определяют следующим образом:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}. \quad (4)$$

В зависимости от значений параметров, распределение Вейбулла может использоваться для моделирования разных сценариев, включая появление дефектов в элементах искусственных сооружений.

Наиболее полную информацию о показателях долговечности дает интегральная функция распределения появления анализируемого дефекта. Для этого необходимо построить функцию срока эксплуатации элемента мостового сооружения до появления дефекта. С этой целью производятся наблюдения за сооружениями и регистрируются моменты появления дефектов. Как уже было отмечено, наблюдения за элементами сооружения выполняют в ходе периодических осмотров и обследований, а фиксацию результатов осуществляют в информационной системе. Информация хранится в виде записей об обнаружении дефектов, содержащих следующие данные: вид дефекта и его степень развития, дата обнаружения дефекта, дата изменения степени развития (качественная и/или количественная) дефекта, дата устранения дефекта.

Для построения интегральной функции распределения необходимо произвести анализ результатов наблюдений. Возможны неполные и полные реализации наблюдений. Под полной реализацией имеется в виду результат наблюдений, завершившийся появлением дефекта, под неполной реализацией – наблюдение, завершившееся отсутствием дефекта, т. е. в момент окончания наблюдений на сооружении не было установлено наличие анализируемого дефекта. Как правило, выборка сооружений имеет как полные, так и неполные реализации. В таком случае используется следующий алгоритм расчета [17]:

1. Результаты наблюдений сортируются по времени наблюдения (сроку эксплуатации) конструкции в возрастающем порядке.

2. Каждому наблюдению в порядке его следования присваивается номер $n \in (1, 2, 3, \dots)$.

3. Для каждого наблюдения, закончившегося полной реализацией, происходит корректировка номера, учитывающая количество неполных реализаций с меньшим временем наблюдения по формуле

$$n_{\text{кор}} = \frac{(N - n)n_{\text{кор-1}} + (N + 1)}{N - n + 1}, \quad (5)$$

где N – количество наблюдений; n – порядковый номер наблюдения; $n_{\text{кор-1}}$ – предыдущий скорректированный ранг (для первой полной реализации равен 0).

4. Для каждой полной реализации вычисляется значение эмпирической функции рас-

пределения с двумя параметрами ($\gamma = 0$) по формуле

$$F_i(t) = \frac{n - 0,3}{N + 0,4}. \quad (6)$$

5. Определяются значения параметров распределения Вейбулла (β и η), которые дают наиболее близкую к эмпирической функцию распределения. Для расчета этих параметров могут быть использованы разные подходы: графоаналитический метод, метод квантилей или метод максимального правдоподобия.

Для расчета параметров β и η методом квантилей в расчетные формулы включают два значения эмпирической функции распределения (F_1 и F_n , где n – номер последней полной реализации). Затем вычисляют параметры функции распределения по формулам:

$$\beta = \log_{\frac{t_n}{t_1}} \frac{\ln(1 - F_n)}{\ln(1 - F_1)}; \quad (7)$$

$$\eta = \frac{t_1}{(-\ln(1 - F_1))^{\frac{1}{\beta}}}, \quad (8)$$

где t_1 и t_n – срок эксплуатации сооружения в первой и n -й реализациях соответственно.

Результаты исследования

По вышеприведенному алгоритму на основе результатов наблюдения за отдельными элементами железнодорожных мостовых сооружений (русовыми опорами) построены эмпирические функции возникновения различных дефектов, снижающих долговечность русловых опор. На их основе получены функции распределения Вейбулла с двумя параметрами, представленные на рис. 1 и 2 для разных дефектов. В качестве исходных данных использованы сведения из отчетов водолазной обследовательской станции. Объем выборки составил 812 русловых опор, на которых было зафиксировано 2 419 дефектов с влиянием на долговечность. Согласно исходным данным, самыми распространенными дефектами (количество более 100 шт. из выборки) являются: расстройство кладки, трещины различного характера, морозное разрушение бетона, выщелачивание цементного камня, а также стеска поверхности опоры ледоходом с образованием сколов (табл. 1). При анализе статистики не учитывались одинаковые дефекты на одной опоре с разной локализацией.

Для оценки долговечности и построения графика распределения Вейбулла учтены следующие данные по опорам: срок эксплуатации (от 9 до 165 лет), наличие дефекта, влияющего на долговечность (количество конструкций с дефектом не менее 100 шт.), а также категория дефектов по долговечности в диапазоне Д1-Д3. Для определения параметров функции (формы и масштаба) использован ранее описанный метод квантилей.

Графики распределения появления того или иного дефекта в зависимости от срока эксплуатации опоры приведены на рис. 1, графики плотности вероятностей – на рис. 2.

Для построения графика вероятности появления дефекта конкретной категории в зависимости от срока эксплуатации опоры выбран самый распространенный и имеющий наибольшее количество дефектов с категориями Д2 и Д3 дефект «расстройство кладки». График зависимости появления дефекта «расстройство кладки» конкретной категории в зависимости от срока эксплуатации показан на рис. 3.

На рис. 1 видно, что с увеличением времени эксплуатации конструкций возрастает вероятность появления рассматриваемого дефекта в ней. Например, вероятность появления дефекта «расстройство кладки» для опоры, эксплуатируемой в течение 50 лет, составляет около 12 %. Однако при эксплуатации опоры в течение 100 лет вероятность появления дефекта возрастает до 61 %. На рис. 2 приведена вероятность появления рассматриваемого дефекта в конкретный год эксплуатации конструкции. Например, наибольшая вероятность появления дефекта «расстройство кладки» в эксплуатируемой опоре приходится на 88 год ее эксплуатации. Из рис. 3 видно, что вероятность появления на раннем этапе эксплуатации опоры расстройства кладки с категорией Д1 в несколько раз выше, однако с течением времени дефекты категории Д1 переходят в Д2 и после в Д3, таким образом уменьшая показатель долговечности опоры. Однако при построении графиков, показанных на рисунке 3, не учтен переход дефектов из категории Д1 в Д2 и затем в Д3, поскольку такие сведения отсутствовали в исходных данных.

Таблица 1

Исходные данные по дефектности русловых опор

Дефект	Общее количество опор, шт.	Количество опор с наличием дефекта категории		
		Д1	Д2	Д3
Расстройство кладки	402	247	97	58
Трещины	397	340	32	25
Морозное разрушение бетона	258	118	105	35
Выщелачивание цементного камня	192	101	90	1
Сколы, раковины, стеска поверхности ледоходом	101	44	30	27

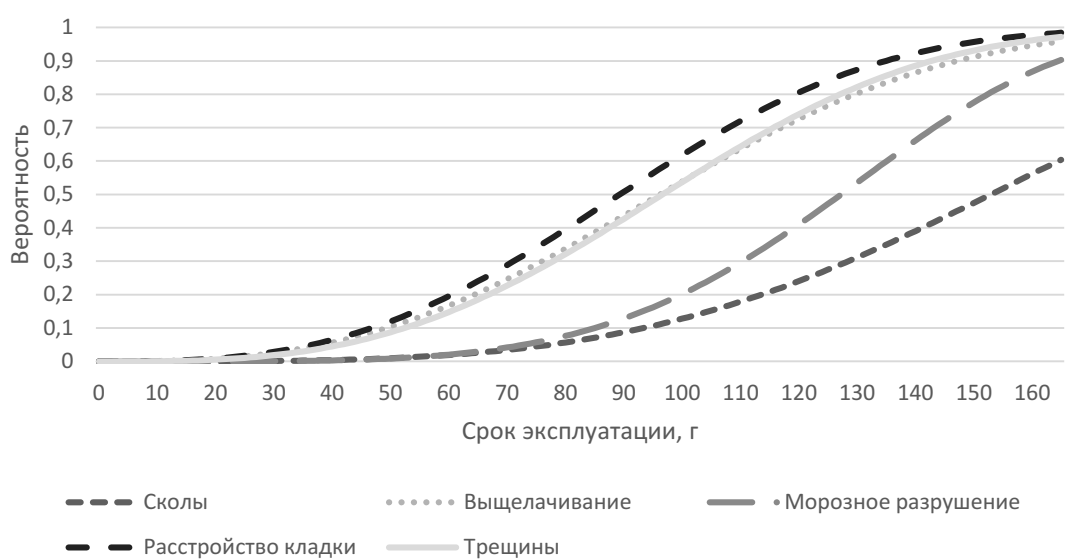


Рис. 1. Функции вероятности появления дефекта в русловой опоре моста в зависимости от срока эксплуатации

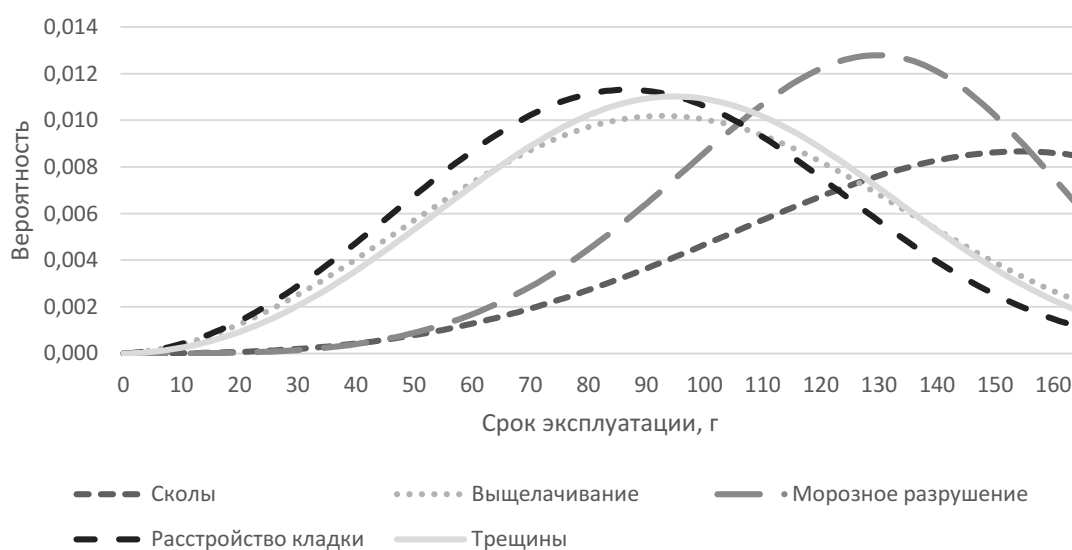


Рис. 2. Графики плотности вероятности распределения появления дефекта в русловой опоре моста в зависимости от срока эксплуатации

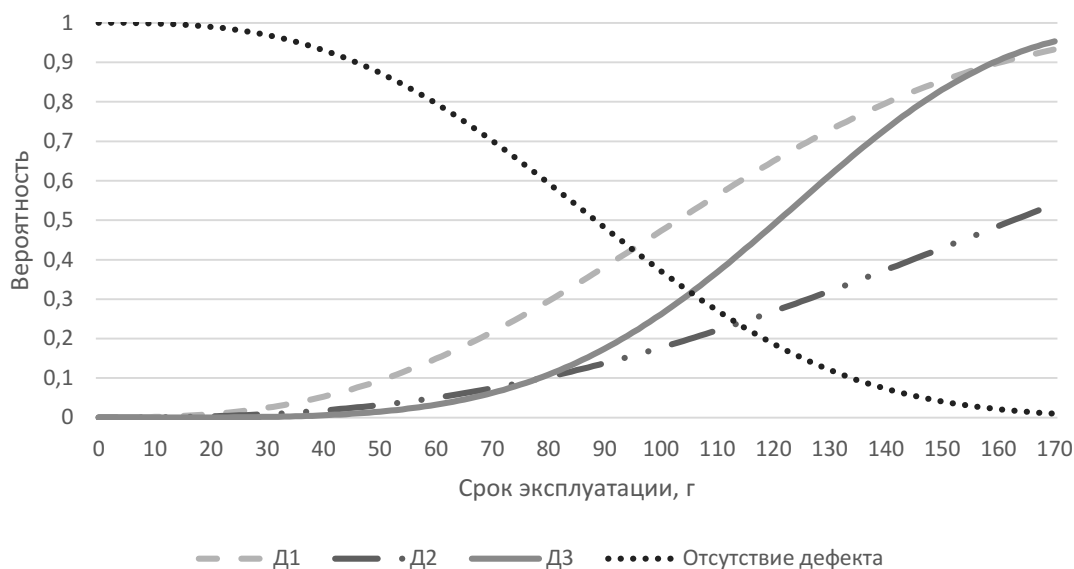


Рис. 3. Функции вероятности появления дефекта «расстройство кладки» разной степени развития (категории) в русловой опоре моста в зависимости от срока эксплуатации

Имея такие эмпирические функции появления и развития дефектов и показатели распределения этих функций, можно вычислить параметры долговечности аналогичных сооружений (средний срок службы до появления дефекта или гамма-процентный показатель), которые эксплуатируются в подобных условиях, но на которых еще не появились анализируемые дефекты деградационного характера.

Средний срок эксплуатации до появления дефекта элемента сооружения определяют по формуле

$$\bar{T} = t_0 + \eta \Gamma \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right), \quad (9)$$

где t_0 – уже выполненная наработка элемента (с момента начала эксплуатации до диагностиче-

ского обследования или на текущий момент); Γ – гамма-функция: $\Gamma(n) = \int_0^\infty e^{-x} x^{n-1} dx$.

Гамма-процентный показатель появления дефекта в элементе сооружения определяют по формуле

$$T_\gamma = t_0 + \eta (-\ln R)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (10)$$

где R – степень обеспеченности, с которой определяется T_γ , например $R = 0,95$.

Результаты определения среднего срока бездефектной эксплуатации и гамма-процентного показателя появления дефектов в русловых опорах мостов на основе показателей распределения Вейбулла (см. рис. 1) приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, при учете и анализе эксплуатационных сведений о конструкциях

Таблица 2

Сроки эксплуатации сооружения до появления дефектов в опорах при разной степени обеспеченности

Дефект	Средний срок эксплуатации до появления дефекта ($\bar{T}$), год	Гамма-процентный показатель T_γ появления дефекта при степени обеспеченности R , год			
		0,7	0,8	0,9	0,95
Расстройство кладки	90,4	71,1	60,5	46,8	36,5
Трещины	97,4	77,9	66,8	52,4	41,4
Морозное разрушение бетона	125,9	110,4	99,8	85,0	72,8
Выщелачивание цементного камня	97,6	76,0	64,4	49,4	38,2
Сколы, стеска поверхности ледоходом	152,2	128,5	113,6	93,3	77,3

мостов возможно определить и средний срок эксплуатации до появления дефекта, и вероятность появления дефекта с какой-либо обеспеченностью. Однако, исходя из того, что в исследуемой выборке не был учтен ряд эксплуатационных данных, сроки службы опор до появления анализируемых дефектов, вероятно, получены завышенными.

Выводы

Использование полноценной и достоверной статистики по истории эксплуатации элементов мостовых сооружений позволяет определить вероятность появления того или иного дефекта в подобных конструкциях. Полученные в рамках данной работы функции распределения возникновения и развития исследуемых дефектов составляют базис для прогнозирования параметров долговечности опор мостовых сооружений и оценки их остаточного срока службы.

Следует отметить, что используемые в работе исходные данные не учитывают отдельные факторы, которые на данном этапе учесть невозможно по причине их отсутствия. Во-первых, неизвестно на сколько раньше появился дефект на русловой опоре, чем указано в отчетах. Во-вторых, ранее появившиеся дефекты могли быть устранены в рамках какого-либо ремонта и, таким образом, не попали в выборку. В-третьих, отсутствуют сведения о переходе дефекта из одной категории в другую (в статистике рассматривается, что некоторые дефекты сразу имеют категорию Д2 или Д3, при этом не учитывается, что этот дефект мог образоваться гораздо ранее и иметь на начальном этапе развития категорию Д1). В-четвертых, не учитывается информация о различном конструктивном исполнении русловых опор (для опор разной

конструкции характерны различные дефекты), что приведет к изменению объемов выборки.

Для применения вероятностных подходов определения остаточного ресурса элементов мостового сооружения необходимо располагать полноценными эксплуатационными данными о конструкциях сооружения, начиная с момента его строительства, чтобы иметь возможность установить объективные параметры закона распределения времени до появления дефектов. При использовании распределения Вейбулла такими параметрами являются параметр формы β и параметр масштаба η , которые должны быть получены по результатам статистической обработки данных о появлении/развитии дефектов однотипных элементов. Кроме того, для практического расчета необходимы сведения о техническом состоянии конкретного элемента сооружения, условиях его эксплуатации, включая проведение ремонтно-восстановительных мероприятий. Такие данные, как правило, должны накапливаться и систематизироваться в единой информационно-аналитической системе по искусственным сооружениям на сети дорог (например, АСУ ДМ ИССО, ЕК АСУИ ИССО и др.).

В заключение следует отметить, что мостовые сооружения на сети железных дорог эксплуатируются в очень разнообразных условиях, включающих систему содержания, режим движения, климатический фактор, оснащенность службы пути ресурсами и др. Все эти особенности необходимо учитывать при формировании эмпирических функций появления/развития дефектов и определении показателей распределения этих зависимостей для решения задач по оценке остаточного срока службы несущих конструкций мостовых сооружений.

Список источников

1. Efimov S., Bokarev S., Pribytkov S. Durability of operated reinforced concrete superstructures of railroad bridges // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 216, No. 01005. DOI 10.1051/matecconf/201821601005.
2. Бокарев С. А., Прибытков С. С., Ефимов С. В. Остаточный ресурс железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20, № 3. С. 169–183. DOI 10.31675/1607-1859-2018-20-3-169-183. EDN XQWPHF.
3. Ефимов С. В., Квитка В. В. Долговечность железобетонных пролетных строений автодорожных мостов // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков : сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, Москва, 15 декабря 2021 г. ООО «Институт развития образования и консалтинга». 2021. С. 136–143. EDN BMYYSO.
4. Macho M., Ryjáček P., Matos J. Fatigue Life Analysis of Steel Riveted Rail Bridges Affected by Corrosion // Structural Engineering International. 2019. Vol. 29. P 551–562. URL: <https://doi.org/10.1080/10168664.2019.1612315>.

5. Comparison of different methods for lifetime assessment of a welded railway bridge for sustainable use / D. Siebert, C. Radlbeck, M. Mensinger, A. Burkart // IABSE Symposium Tokyo 2025. 2025. P 567–575. URL: <https://doi.org/10.2749/tokyo.2025.0567>.
6. Fatigue life assessment of intercity track viaduct based on vehicle–bridge coupled system / C. Cui, F. Feng, X. Meng, X. Liu // *Mathematics*. 2022. Vol. 10, No. 1663. URL: <https://doi.org/10.3390/math10101663>.
7. Time-dependent reliability assessment of aging structures considering stochastic resistance degradation process / Y. Yang, J. Peng, C. Cai [et al.] // *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 217. Art. 108105. URL: <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108105>.
8. Methodology for Assessing the Technical Condition and Durability of Bridge Structures / K. Medvediev, A. Kharchenko, A. Stakhova [et al.] // *Infrastructures*. 2024. Vol. 9, No. 16. URL: <https://doi.org/10.3390/infrastructures9010016>.
9. Assessment of remaining service life of deteriorated concrete bridges under imprecise probabilistic information / J. Alam, L. Neves, H. Zhang, D. Dias-Da-Costa // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. Vol. 167, part 2. Art. 108565. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108565>.
10. Life-cycle modelling of concrete cracking and reinforcement corrosion in concrete bridges : A case study / S. Chen, C. Duffield, S. Miramini [et al.] // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 237, Art. 112143. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112143>.
11. Review of Research on Prediction Models for Residual Life of Concrete Structures / L. Qi, X. Peng, Q. Yang [et al.] // *Coatings*. 2025. Vol. 15, No. 693. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings15060693>.
12. Dizaj E., Padgett J., Kashani M. A Markov chain-based model for structural vulnerability assessment of corrosion-damaged reinforced concrete bridges // *Philosophical transactions of the royal society A, mathematical, physical, and engineering sciences*. 2021. Vol. 379. Art. 20200290. URL: <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0290>.
13. Надежкин В. А., Надежкина С. А. Модели статистической оценки показателей надежности рельсовых линий // *Транспорт и информационные технологии*. 2025. Т. 15, № 4. С. 48–64. DOI 10.12731/3033-5965-2025-15-4-410. EDN BBZCAA.
14. Системное моделирование, оценка и оптимизация рисков функционирования распределенных компьютерных систем / Ю. П. Степин, Д. Г. Леонов, Т. М. Папилина, О. А. Степанкина // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2020. Т. 12, № 6. С. 1349–1359. DOI 10.20537/2076-7633-2020-12-6-1349-1359. EDN JDKEWS.
15. Корнилов Т. А., Суплецов В. С. Вероятностная оценка расчетного срока службы строительных конструкций промышленных предприятий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 8. С. 13–17. EDN WHKJZL.
16. Краснощеков Ю. В. Вероятностный расчет строительных конструкций с учетом асимметрии распределения случайных величин и функций // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2020. Т. 17, № 5 (75). С. 636–650. DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-5-636-650. EDN NQACTC.
17. ГОСТ Р 50779.27–2017. Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. Москва : Стандартинформ, 2017.

References

1. Efimov S., Bokarev S., Pribytkov S. Durability of operated reinforced concrete superstructures of railroad bridges. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 216. No. 01005. DOI 10.1051/mateconf/201821601005.
2. Bokarev S. A., Pribytkov S. S., Efimov S. V. Residual life of reinforced concrete superstructures of railway bridges. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2018;20(3):169–183. DOI 10.31675/1607-1859-2018-20-3-169-183.
3. Efimov S. V., Kvitka V. V. Durability of reinforced concrete superstructures of highway bridges. *Development of Science and Practice in a Globally Changing World in the Context of Risks: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference, Moscow, December 15, 2021*. 2021. P. 136–143. EDN BMYYSO.
4. Macho M., Ryjáček P., Matos J. Fatigue life analysis of steel riveted rail bridges affected by corrosion. *Structural Engineering International*. 2019;29:551–562. URL: <https://doi.org/10.1080/10168664.2019.1612315>.
5. Siebert D., Radlbeck C., Mensinger M., Burkart A. Comparison of different methods for lifetime assessment of a welded railway bridge for sustainable use. *IABSE Symposium Tokyo 2025*. 2025. P 567–575. URL: <https://doi.org/10.2749/tokyo.2025.0567>.
6. Cui C., Feng F., Meng X., Liu X. Fatigue Life Assessment of Intercity Track Viaduct Based on Vehicle-Bridge Coupled System. *Mathematics*. 2022;10(1663). URL: <https://doi.org/10.3390/math10101663>.

7. Yang Y., Peng J., Cai C. [et al.]. Time-dependent reliability assessment of aging structures considering stochastic resistance degradation process. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022;217(108105). URL: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108105>.
8. Medvediev K., Kharchenko A., Stakhova A. [et al.]. Methodology for assessing the technical condition and durability of bridge structures. *Infrastructures*. 2024;9(16). URL: <https://doi.org/10.3390/infrastructures9010016>.
9. Alam J., Neves L., Zhang H., Dias-Da-Costa D. Assessment of remaining service life of deteriorated concrete bridges under imprecise probabilistic information. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022;167(2):108565. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108565>.
10. Chen S., Duffield C., Miramini S. [et al.]. Life-cycle modelling of concrete cracking and reinforcement corrosion in concrete bridges: A case study. *Engineering Structures*. 2021;237(112143). URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112143>.
11. Qi L., Peng X., Yang Q. [et al.]. Review of Research on Prediction Models for Residual Life of Concrete Structures. *Coatings*. 2025;15(693). URL: <https://doi.org/10.3390/coatings15060693>.
12. Dizaj E., Padgett J., Kashani M. A Markov chain-based model for structural vulnerability assessment of corrosion-damaged reinforced concrete bridges. *Philosophical Transactions of the Royal Society A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*. 2021;379:20200290. URL: <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0290>.
13. Nadezhkin V. A. Nadezhkina S. A. Models for statistical assessment of reliability indicators of rail lines. *Transportation and Information Technologies in Russia*. 2025;15(4):48–64. DOI 10.12731/3033-5965-2025-15-4-410. EDN BBZCAA.
14. Stepin Y. P., Leonov D. G., Papilina T. M., Stepankina O. A. System modeling, risks evaluation and optimization of a distributed computer system. *Computer Research and Modeling*. 2020;12(6):1349–1359. (In Russ.). DOI 10.20537/2076-7633-2020-12-6-1349-1359. EDN JDKEWS.
15. Kornilov T. A., Suplecov V. S. Probabilistic assessment of the estimated service life of building structures of industrial enterprises. *Industrial and Civil Construction*. 2016;(8):13–17. (In Russ.). EDN WHKJZL.
16. Krasnoshchekov Yu. V. Probability calculation of building structures considering asymmetry of random values and functions distribution. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University*. 2020;17(75):636–650. (In Russ.). DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-5-636-650. EDN NQACTC.
17. GOST R 50779.27–2017. Statistical methods. Weibull distribution. Data analysis. Moscow: Standartinform; 2017. (In Russ.).

Информация об авторах

С. В. Ефимов – кандидат технических наук, доцент, директор СибНИИ мостов, доцент кафедры «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения.

К. О. Жунев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник СибНИИ мостов Сибирского государственного университета путей сообщения.

И. В. Чаплин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты», старший научный сотрудник СибНИИ мостов Сибирского государственного университета путей сообщения.

И. О. Шеин – инженер СибНИИ мостов Сибирского государственного университета путей сообщения.

А. М. Попов – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Теоретическая механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

S. V. Efimov – Candidate of Engineering, Associate Professor, Director of SibNII Mostov, Associate Professor of the Bridges Department, Siberian Transport University.

K. O. Zhunev – Candidate of Engineering, Senior Researcher at SibNII Mostov, Siberian Transport University.

I. V. Chaplin – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Bridges Department, Senior Researcher at SibNII Mostov, Siberian Transport University.

I. O. Shein – Engineer at SibNII Mostov, Siberian Transport University.

A. M. Popov – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Theoretical Mechanics Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 04.05.2026; одобрена после рецензирования 21.05.2026; принята к публикации 26.06.2026.

The article was submitted 04.05.2026; approved after reviewing 21.05.2026; accepted for publication 26.06.2026.