УДК 624.271 / 69.059.4

*С.А. Бокарев, С.С. Прибытков, С.В. Ефимов*

*Сибирский государственный университет путей сообщения*

**остаточный ресурс железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов**

На сегодняшний день отсутствует единая подтвержденная опытом эксплуатации и утвержденная на федеральном уровне методика оценки остаточного ресурса железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов. В статье сделан обзор отечественных и зарубежных нормативных документов по определению долговечности железобетонных мостовых конструкций. Приведены данные о неисправностях эксплуатируемых железобетонных пролетных строений, влияющих на их грузоподъемность и долговечность. За прошедшие 30 лет отечественными и зарубежными учеными проведены обширные исследования по вопросу определения остаточного ресурса и предложены различные методики. Выполнен анализ недостатков и преимуществ данных методик. На основе изучения опыта эксплуатации и существующих подходов была предложена методика оценки остаточного срока службы конструкций, которая учитывает наличие неисправностей, историю эксплуатации, климатический фактор и позволяет определить вероятность изменения состояния сооружения по нескольким сценариям. Процесс изменения состояния является случайным. Для прогнозирования состояния и расчета показателей надежности сооружений и их элементов используется модель, основанная на полумарковском процессе. Источники данных для моделей надежности - результаты наблюдений за состоянием сооружений, либо математические модели возникновения и развития неисправностей. Представлен пример определения остаточного ресурса железобетонного пролетного строения при возникновении и развитии коррозии рабочей арматуры. Данная методика соответствует современному подходу, а также отечественным нормативным документам и реализует принятую на сети железных дорог РФ концепцию эксплуатации и содержания искусственных сооружений.

**Ключевые слова:** *железобетонные пролетные строения; железнодорожные мосты; долговечность; остаточный ресурс; грузоподъемность.*

**RESIDUAL life OF REINFORCED concrete superstructures OF RAILWAY BRIDGES**

To date, there is no single methodology confirmed by the operational experience and approved at the federal level for estimating the residual life of reinforced concrete superstructures of railway bridges. The article provides an overview of domestic and foreign regulatory documents to determine the durability of reinforced concrete bridge construction. The data on the fault of the exploited of reinforced concrete superstructures that affect their capacity and durability. Over the past 30 years, domestic and foreign scientists have conducted extensive research on the determination of the residual life and proposed various methods. An analysis of the shortcomings and advantages of these methods has been performed. Based on the study of operational experience and existing approaches, a methodology was proposed for estimating the residual life of construction, which takes into account the presence of malfunctions, the operating history, the climatic factor, and allows determining the probability of changing the technical state of the construction in several scenarios. The process of changing the state is random. For forecasting the state and calculating indicators of the reliability of structures and their elements, a model based on the semi-Markov process is used. Data sources for reliability models are the results of observations of the technical state of construction, or mathematical models of the occurrence and development of faults. An example of the determination of the residual life of reinforced concrete superstructures in the event of occurrence and development of corrosion of working reinforcement is given. This methodology corresponds to the modern approach, as well as to domestic regulatory documents and implements the concept of operation and maintenance of artificial construction adopted on the railways network on the Russian Federation.

**Ключевые слова:** *reinforced concrete superstructures; railway bridges; durability; residual resource; carrying capacity*

В настоящее время на сети железных дорог ОАО «РЖД» эксплуатируют более 43-х тысяч железобетонных пролетных строений [2]. Это плитные или ребристые конструкции, с числом ребер от двух до четырех, которые запроектированы под разные нагрузки. Срок службы 4,6% пролетных строений, выполненных под нагрузку 1907 г., составляет 100 и более лет, под нагрузку 1925 г. (данные пролетные строения составляют 2,6% от общего количества эксплуатируемых железобетонных пролетных строений) – от 80 до 90 лет. Большинство пролетных строений, рассчитанных под нагрузку Н7 (6,1%) и Н8 (29,3%) эксплуатируют порядка 70 - 85 лет. Срок эксплуатации пролетных строений, запроектированных под нагрузку С14 (54,1%), как правило, не превышает 50 лет.

В период эксплуатации на железобетонные пролетные строения кроме постоянных и временных нагрузок воздействуют факторы внешней среды, которые оказывают в основном отрицательное влияние на железобетон, снижая его потребительские свойства. Техническое состояние основных несущих конструкций пролетных строений обусловлено преимущественно сроком их службы, конструктивными особенностями и условиями эксплуатации. В таблице 1 представлено относительное количество на сети ОАО «РЖД» пролетных строений с неисправностями, которые оказывают влияние на долговечность и грузоподъемность (согласно базе данных АСУ ИССО).

Из таблицы видно, что наибольшее количество неисправностей вызвано воздействием воды, попеременным замораживанием и оттаиванием бетона –(выщелачивание и морозное разрушение) и отклонением в содержании балластной призмы (толщина слоя балласта и эксцентриситет пути больше допустимых по нормативным документам значений).

Определение остаточного ресурса является обязательной регламентной процедурой в системе эксплуатации мостов. На сегодняшний день в мировой практике эта проблема полностью не решена и существуют различные подходы и способы определения нормативного и остаточного сроков службы железобетонных пролетных строений.

*Таблица 1*

**Неисправности пролетных строений на сети ОАО «РЖД»**

|  |  |
| --- | --- |
| Наименование неисправности | Относительное количество пролетных строений с неисправностью, %  |
| Выщелачивание цементного камня | 30,4% |
| Толщина балласта больше допустимой | 18,7% |
| Эксцентриситет пути более 5 см | 17,9% |
| Морозное разрушение бетона | 9,8% |
| Отслоение защитного слоя арматуры | 4,8% |
| Продольный борт наращен более чем на 20 см | 4,5% |
| Трещины вдоль стержней рабочей арматуры | 2,6% |
| Коррозия арматуры | 1,3% |

Сроки службы мостов в большинстве зарубежных нормативных документах на проектирование железобетонных конструкций (в том числе мостов), а именно в EN 1992-1-1: Eurocode 2: «Design of concrete structures», ES ISO 2394:2012 (Эфиопия), DIN 1045-1-2008(Германия) устанавливают равным 100 лет. Нормы Великобритании BS:5400 по проектированию мостовых конструкций устанавливают проектный срок службы 120 лет. Указанные нормативные документы регламентируют сроки службы мостов при выполнении всех требований того или иного документа и в зависимости от конструктивных характеристик моста (толщина защитного слоя, класс бетона, армирование). Однако в них отсутствует аппарат оценки долговечности и модели прогнозирования, позволяющих определять и нормировать срок службы железобетонных мостов.

В отечественных нормах Технические условия проектирования капитального восстановления и строительства новых мостов и труб под железную дорогу нормальной колеи (ТУМП-47), СН 200-62 «Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб», СН 365-67 «Указания по проектированию железобетонных и бетонных конструкций железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб», СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы», СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы», по которым построено большинство эксплуатируемых отечественных мостов, отсутствуют рекомендации по оценке долговечности мостов и регламентированию их сроков службы. В ГОСТ Р 54257-2010 «Надежность строительных конструкций и оснований» приведены примерные сроки службы сооружений разных классов, установленные в зависимости от назначения и последствий от их разрушения. В Инструкции по оценке технического состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах РФ [4] приводится оценка остаточного срока службы пролетного строения в зависимости от общего балла по долговечности, который определяют с учетом неисправностей. Также указан нормативный срок службы железобетонного пролетного строения равный 70 годам.

Согласно нормам Украины (ДБН В.2.3-22: 2009) оценка технического состояния пролетных строений осуществляется путем идентификации их эксплуатационного состояния. Учитывается, что в течение всего срока службы мост в целом или его конструктивный элемент последовательно пребывает в одном из пяти эксплуатационных состояний. Каждому эксплуатационному состоянию соответствуют определенный уровень износа элемента и регламентируемые эксплуатационные или ремонтные мероприятия. Остаточный ресурс моста прогнозируют согласно определению времени перехода элементов моста из одного эксплуатационного состояние в другое.

В Рекомендациях по оценке надежности строительных конструкций зданий и сооружений по внешним признакам, разработанном ЦНИИПромзданий, общая оценка поврежденности здания и сооружения производится по формуле:

где , , ... - максимальная величина повреждений элементов конструкций, , , ... - коэффициенты значимости элементов конструкций.

Коэффициенты значимости конструкций устанавливаются на основании экспертных оценок, учитывающих социально-экономические последствия разрушения отдельных видов конструкций, характера разрушения (разрушение с предварительным оповещением посредством развития пластических деформаций или мгновенное хрупкое разрушение). Относительная оценка надежности сооружения производится по формуле:

Величину повреждения строительных конструкций через лет ее эксплуатации определяют по формуле

где - постоянная износа, определяемая по данным обследования на основании изменения несущей способности в момент обследования; - относительная надежность, определяемая по категории технического состояния конструкции в зависимости от повреждений; - срок эксплуатации в годах на момент обследования.

Срок эксплуатации конструкции до капитального ремонта: Срок эксплуатации конструкции до аварийного состояния: .

В своих работах Чирков В.П. [11, 12] утверждает, что нормативный срок службы может быть установлен различными путями: на основе минимума общих затрат на строительство и текущих расходов при эксплуатации сооружения, на основе экспертной оценки и опыта эксплуатации. Чирков В.П. вывел вероятностные формулы для прогнозирования срока службы по следующим признакам:

- выносливость бетона:

где *,* – число циклов нагружения в единицу времени, – характеристика безопасности при Р = 0,99 соответствует , – коэффициент вариации временной нагрузки, – коэффициент, учитывающий уровень нагружения и статистические свойства нагрузок, – характеристика кривой выносливости;

- выносливости арматуры:

где – коэффициент вариации прочности арматуры, – коэффициент, учитывающий уровень нагружения и статистические свойства нагрузок, – характеристика кривой выносливости арматуры;

Дальнейшие исследования позволили несколько усовершенствовать методику. Р.К. Мамажановым предложена методика определения остаточного срока железобетонных пролетных строений по признаку выносливости бетона [8], в которой для описания процесса развития трещинообразования в бетоне сжатой зоны пролетных строений мостов использован основной параметр механики разрушения - коэффициент интенсивности напряжений . Математическая мо­дель остаточного ресурса имеет вид:

где - предельное количество циклов многократно повторного приложения нагрузок до разрушения; - время от начала эксплуатации до момента диагностирования, в годах; - количество поездов i-го типа в год, прошедших за период эксплуатации; - количество по­ездов і-го типа в год после диагностирования; - эквивалентное количество циклов; - коэффициент интенсивности напряжений в момент диагностики, зависящий от предыстории нагружения; - критический коэффициент интенсивности напряжений, определяемый испытанием бетона; *,*  - коэффициенты вариации нагрузки и критического коэффициента интенсивности напряжений соответственно; - функция, учитывающая изменение свойств материала во времени.

Основным достоинством этой методики является учет статистического разброса нагрузок, перспективы их изменения, истории нагружения. Однако, использование этой модели в практических расчетах сложно и требует наличия данных о структуре поездопотока, пропущенного по мосту в период эксплуатации, не возможно учитывать работу бетона в сжатой зоне при высоких уровнях нагружения в сочетании с воздействием окружающей среды.

Общим недостатком двух вышеуказанных методик, является отсутствие прямого вероятностного расчета остаточного срока службы, статистический разброс учитывается, как и в используемых нормативных документах, с помощью различных коэффициентов.

Иосилевский Л.И. [5, 6] утверждает, что необходимо определение в любой момент времени важнейших показателей напряженного состояния, от которых зависит надежность сооружений в целом. Для железобетонных пролетных строений к таким показателям относятся прочность бетона, глубина карбонизации защитного слоя, раскрытие трещин, степень и характер коррозии арматуры, упругие и остаточные прогибы, деформации бетона и арматуры. Остаточный срок службы пролетного строения характеризуется периодом эксплуатации до достижения пороговых значений.

Графическая интерпретация изменения несущей способности *R* и воздействия нагрузки *S* на протяжении срока службы представлена на рисунке 2.

Иосилевский Л.И. и Федулов И.В. разработали модель изменения ресурса прочности сооружения (безразмерная величина) во времени в зависимости от критических коэффициентов интенсивности напряжений:

где , соответственно критические коэффициенты интенсивности напряжений, определенные при выполнении технической диагностики, перед разрушением и в начале эксплуатации.

|  |  |
| --- | --- |
|  | R – изменение несущей способности; S – изменение временных нагрузок; f – плотность распределение срока службы;1 – зона повышенного риска;2 - зона разрушения. |

*Рис. 1.* Изменение несущей способности *R* и воздействия *S* и плотность f распределение срока службы

Математическая модель критического коэффициента интенсивности напряжений представлена в следующем виде:

где – значение критического коэффициента интенсивности напряжений в начале эксплуатации; – показатель кривой выносливо­сти бетона; – срок эксплуатации на момент оценки ресурса (годах); – срок приработки конструкции; – количество циклов в год;

где – прочность бетона при сжатии (проектная), МПа, – коэффициент, находится в пределах 0,03-0,04 с обеспеченностью 0,95.

Предлагаемая модель применима только при достаточной научной информации об изменяющихся во времени прочностных возможностях материалов на момент технической диагностики и в конце эксплуатации, когда имеется информация о состоянии сооружения, динамике снижения ресурса, полученная по результатам проводимых обследований эксплуатирующими организациями.

Методика определения остаточного срока службы мостовых кон­струкций Шестерикова В.И. и Васильева А.И. [3] основана на экономической целесо­образности дальнейшей эксплуатации конструкции. Срок службы эле­мента конструкции определяется отношением стоимости его ремонта с дальнейшей эксплуатацией к варианту полной замены элемента. Авторы утверждают, что физический износ конструкции представляет собой потерю несущей способности и может быть описан формулой:

где – износ в долях несущей способности на момент времени t; – показатель интенсивности износа (по данным автора находится в пределах 0,008-0,012); – срок «приработки» (в годах), т.е. начальный период эксплуатации, когда износа еще не происходит; – текущий момент времени от начала эксплуатации (в годах).

где – критический износ, при котором прекращается эксплуатация; – срок, соответствующий критическому износу.

Остаточный срок службы определяется следующим образом:

Величины и зависят от типа конструкций, места расположения моста (климатический район) и уровня эксплуатации. Данная методика определения остаточного срока службы, применима только для уже обсчитанных начальных условий (типов конструкций, климатических условий и пр., для которых имеются соответствующие значения и ). Но для других сочетаний исходных параметров расчет сроков службы невозможен вплоть до накопления статистической информации. Величина износа, составляющая основу методики, является интегральным показателем надежности, объединяющая в себе оценку по безопасности, долговечности, грузоподъемности и ремонтопригодности. В железнодорожной практике принято использование именно различных показателей для определения технического состояния сооружения.

Методика Васильева А.И. и Шестерикова В.И., нашла отражение в документе «Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов» [13].

Актуганов И.З. [1] в своих работах утверждает, что железобетонные мосты редко перестают удовлетворять эксплуатационным требованиям из-за увеличения со временем подвижной нагрузки, поскольку, во-первых, это увеличение оказывается относительно небольшим в силу их массивности и, во-вторых, бетон, удовлетворяющий условиям эксплуатации, со временем увеличивает свою прочность для низких классов вдвое, а высоких – на 30-50%, что, как правило, компенсирует возрастание нагрузки. Гораздо большее влияние на надежность железобетонных мостов в эксплуатационной стадии оказывают климатические воздействия.

Все факторы, оказывающие влияние на долговечность железобетонных пролетных строений, разделены на две группы. Факторы первой группы оказывают непосредственное влияние на физико-механические свойства материалов конструкции, изменяя их во времени. К этой группе относятся многократное действие нагрузки, приводящее к уменьшению прочностных свойств бетона и арматуры, многократное действие знакопеременных температур, влажность среды. К этой же группе относятся агрессивное действие среды, карбонизация бетона. Факторы второй группы влияют на долговечность конструкции путем создания такого напряженного или деформированного состояния, которое может привести к отказу конструкции. Ко второй группе факторов относятся постоянные и временные нагрузки, температурные и влажностные воздействия, приводящие к возникновению напряжений и . Условие долговечности при этом:

Таким образом, автор попытался охватить все разнообразие климатических факторов, негативно влияющих на эксплуатационные характеристики бетона и арматуры, но эти исследования не были завершены и не нашли отражение в нормативных документах.

Исследователями из Технического университета г. Риги (Латвия) [15, 16] предложен метод оценки технического состояния сооружения, оценивающий развитие процесса коррозии в 10 ступеней и позволяющий систематически идентифицировать влияние различных факторов окружающей среды и конструкции на долговечность железобетонного моста. По результатам обследования мостов установлено, что 64,8% наблюдаемых участков поверхности моста не имеют признаков повреждения арматуры, коррозионные повреждения конструктивной арматуры имеют место на 14% площади поверхности, рабочей арматуры - 4% площади поверхности. Данный метод применим для определения времени инициации коррозии от воздействия хлоридов или процесса карбонизации. Необходимо систематизировать информацию об этапах развития коррозии, которая может быть получена при осмотрах мостов.

Предлагаемая в данной работе методика определения остаточного срока службы основана на следующих предпосылках:

1. Сохраняется подход, реализованный в Инструкции по оценки состояния (сохраняется бальная оценка, в том числе по параметрам надежности – безопасность, грузоподъемность, долговечность, ремонтопригодность).
2. Полное соответствие ГОСТ 32192-2013 «Надёжность в железнодорожной технике. Основные понятия, термины и определения».
3. Реализуется концепция методологии УРРАН (Управление ресурсами, рисками и надежностью на всех этапах жизненного цикла).

В первую очередь следует уточнить, что именно мы понимаем под остаточным ресурсом объекта. В ГОСТ 32192-2013 написано, что остаточный ресурс – это наработка, исчисляемая от значения наработки в текущий момент времени до перехода в предельное состояние. В этом же стандарте сказано, что предельное состояние – это такое состояние, в котором «дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна на основании оценки рисков». Эта формулировка в той своей части, что определяется словом «недопустима», может быть истолкована аналогично отказу – ведь отказавшее сооружение эксплуатировать нельзя. В Техническом регламенте о безопасности зданий и сооружений» №384-ФЗ о предельном состоянии сказано так: «состояние …, за пределами которого дальнейшая эксплуатация … опасна, недопустима, затруднена или нецелесообразна либо восстановление работоспособного состояния … невозможно или нецелесообразно». Хотя и эта формулировка вызывает вопросы из-за слова «затруднена» - что имеется в виду, не ясно. Определение предельного состояния приведено также в другом техническом регламенте – «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» (ТР ТС 003/2011): «состояние объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, при котором их дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна или восстановление их работоспособности невозможно или нецелесообразно». Из этих определений следует, что предельным может быть и просто неработоспособное состояние (дальнейшая эксплуатация недопустима) и состояние, восстановление из которого невозможно или нецелесообразно, В нашем исследовании мы сосредоточимся на оценке величины наработки до перехода в неработоспособное состояние. Возможность и целесообразность восстановления – это вопросы, которые пока остались за рамками.

Пролетные строения представляют собой сложные системы, состоящие из множества элементов. У каждого элемента свое назначение и конструкция, каждый подвержен, как правило, воздействию нескольких факторов и может иметь множество различных дефектов. Для оценки состояния каждого элемента нужно измерить, вычислить, оценить несколько показателей. Для технических систем существует подход, заключающийся в использовании показателей надежности (безотказности, долговечности, грузоподъемности, ремонтопригодности), характеризующих способность сооружения выполнять требуемые функции.

При эксплуатации в результате повреждений, вызываемых различными природно-климатическими и техногенными воздействиями, у пролетных строений появляются дефекты. Их состояние ухудшается вплоть до возникновения отказа. Таким образом, множество возможных состояний (см. рисунок 2) как элемента, так и сооружения в целом, включает:

1. Исправное (индекс 0) - неисправностей нет, работоспособное, без ограничений скорости, полный остаточный ресурс;

2. Неисправные работоспособные – полностью работоспособные состояния, характеризуемые наличием неисправностей с различной степенью развития и сниженным из-за них остаточным ресурсом;

* хорошее (индекс 1) – неисправности с наименьшей степенью развития;
* удовлетворительное (индекс 2) – неисправности со «средней» степенью развития;
* неудовлетворительное (индекс 3) – серьёзные неисправности;
* предотказное (индекс 4) – работоспособное состояние с неисправностями предельно возможной степени развития, остаточный ресурс практически исчерпан;
* при вводе ограничений скорости для обращающейся нагрузки или запрете пропуска отдельных видов подвижного состава объект переводится в частично работоспособное состояние (индекс 4.1);

3. Неисправное неработоспособное (индекс 5) – существенные неисправности (вплоть до разрушения несущих конструкций), полная неспособность выполнять свои функции, остаточный ресурс исчерпан, движение запрещено.

Ухудшение состояния происходят из-за возникновения повреждений и роста дефектов. Процесс изменения состояния является случайным. Вероятность отказа – события, приводящего к нежелательным последствиям – определяется расчетом по моделям надежности. Для прогнозирования состояния и расчета показателей надежности сооружений и их элементов используется модель, основанная на полумарковском процессе. По моделям надежности определяются вероятности каждого из возможных состояний в любые заданные моменты времени.

*Рис. 2.* Иерархия множества возможных состояний конструкций

Источниками данных для построения модели надежности могут быть результаты наблюдений за состоянием элементов ИССО (под наблюдениями понимаются осмотры, обследования, испытания и итоги расчетов грузоподъемности), математические модели возникновения и развития неисправностей, а также экспертные оценки. Предпочтение должно отдаваться статистике, поскольку оценки, основанные на фактах, лучше экспертных предположений и теоретических выводов. В отсутствие достаточного количества наблюдений за конкретным объектом нужно обобщать наблюдения за всеми похожими на него объектами, а если и этих данных недостаточно – обращаться к математическим моделям, и в последнюю очередь – к экспертным оценкам.

В таблице 2 представлены неисправности железобетонного пролетного строения, характеризующие его состояние.

*Таблица 2*

**Возможные признаки состояния железобетонного пролетного строения**

|  |  |
| --- | --- |
| Состояние пролетного строения | Признаки состояния |
| исправное (**S0**) | неисправности отсутствуют |
| хорошее (**S1**) | -выщелачивание цементного камня;-сколы бетона;-морозное разрушение бетона;-отсутствует или недостаточный защитный слой бетона;-трещины, не изменяющие раскрытие под нагрузкойи другие неисправности с различной степенью развития |
| удовлетворительное (**S2**) |
| неудовлетворительное (**S3**) |
| предотказное (**S4**) иличастично работоспособное (**S4.1**) | по результатам расчета грузоподъемности с учетом неисправностей (например: значительные толщина балласта под шпалой или эксцентриситет пути, низкая прочность бетона, коррозия или разрывы арматуры) для пропуска нагрузки необходим ввод ограничения её скорости или массы |
| неработоспособное (**S5**) | недостаточная грузоподъемность для пропуска обращающейся нагрузки с учетом ограничения скорости |

Расчетом может быть установлено: вероятность отказа в течение заданного времени, среднее время до отказа, гамма – процентный срок службы (время до достижения предельного состояния с заданной вероятностью).

1) Время перехода из состояния S0 в S1.

Случайное время, проведенное железобетонным пролетным строением в состоянии S0 перед переходом в S1, подчиняется закону распределения Вейбулла-Гнеденко с двумя параметрами [7, 9, 14]. График функции, на основе статистической обработки данных наблюдения по Западной – Сибирской дороге представлен на рисунке 3. Функция плотности вероятности этого распределения имеет вид:

где – параметр формы;

 – параметр масштаба («характерный» срок службы).

*Рис. 3.* Плотность распределения вероятности пребывания в S0 перед переходом в S1

Целесообразно построение плотности распределения пребывания в одном состоянии перед переходом в другое для различных дорог или регионов либо использование климатического коэффициента для них.

2) Время перехода из состояния S0 в S4 может быть определено:

- по результатам обследования (значительные отступления от требований содержания мостового полотна, наличие трещин, низкая прочность бетона в сжатой зоне, разрывы и коррозия арматуры);

- расчетом (по модели развития процессов деградации).

Рассмотрим детально определение остаточного срока службы на примере развития коррозии арматуры.

Время от начала эксплуатации до перехода в состояние S4 определяется следующим образом [11, 12]:

где – продолжительность периода инициации коррозии), – климатический коэффициент, – время развития коррозии до потери площади сечения арматуры, снижающего несущую способность пролетного строения до уровня обращающихся нагрузок (например, 10% от общей площади):

где .

В состоянии S4 пропуск нагрузки возможен при введении ограничений по скорости или массе при соблюдении условия:

Продолжительность периода инициации коррозии также подчиняется закону распределения Вейбулла-Гнеденко с двумя параметрами. График функции, на основе статистической обработки данных наблюдения всей сети федеральных автодорог РФ представлен на рисунке 4. Функция плотности вероятности этого распределения имеет вид:

*Рис. 4.* Плотность распределения вероятности периода инициации коррозии

Площадь арматуры подверженной коррозии в любой момент времени определяется следующим образом [12]:

где – диаметр рабочей арматуры, мм; – скорость коррозии арматуры, в интервале 0,08…0,3 мм/год; – показатель степени коррозии, в интервале 0,3…0,5; – время от начала коррозии до текущего или прогнозируемого; – площадь арматуры не подверженная коррозии.

Условие потери 10% площади арматуры:

Таким образом, время от начала развития коррозии до потери 10% площади арматуры определяется следующим способом:

3) Время перехода из состояния S0 в S5 может быть определено:

где – продолжительность развития коррозии до потери такой площади арматуры, при которой предельное усилие в элементе станет равным усилию от поездной нагрузки без учета динамического коэффициента .

В состоянии S5 пропуск нагрузки невозможен.

В заключение отметим, что железобетонные пролетные строения на сети железных дорог эксплуатируются в самых различных по сочетанию климатических зонах и в разной степени подвержены воздействию негативных факторов внешней среды, что особенно необходимо учитывать при определении остаточного срока службы железобетонных пролетных строений.

Предложенная методика позволяет учесть расположение сооружения (климатическим коэффициентом или статистическим распределением характерным для соответствующей климатической зоны), наличие имеющихся неисправностей и определить вероятность изменения состояния сооружения по нескольким сценариям.

# Библиографический список

1. Актуганов И.З. Методика оценки влияния климатических температурно-влажностных воздействий на эксплуатационную надежность и долговечность бетона строительных конструкций. – Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2005 – 76 с.
2. Бокарев С.А., Ефимов С.В. О нормировании высоты продольного борта железобетонных пролетных строений с ездой на балласте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения.- 2016. -№2. С. 10-19.
3. Васильев А.И. Оценка технического состояния мостовых сооружений: учебное пособие. — Москва: КНОРУС, 2017. — 256 с.
4. Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации/ Департамент пути и сооружений ОАО «РЖД». – М., 2006. – 120 с.
5. Иосилевский Л.И. Практические методы управления надежностью железобетонных мостов. - М.: Науч.-изд. центр «»Инженер», 1999. – 295 с.
6. Иосилевский Л.И., Федулов И.В. Прогнозирование сроков службы железобетонных пролетных строений // Путь и путевое хозяйство. -1997. - № 8. С.11 – 14.
7. Левин Б.Р. Справочник по надежности / Под ред. Левина Б.Р., Т.1. М.: Мир, 1969 г., 339 с.
8. Мамажанов, Р. К. Основы теории прогнозирования ресурса железобетонных мостов для Средней Азии : автореф. дис. … д-ра. тех. наук: 05.23.11 / Р. К. Мамажанов. — ЦНИИС. — М., 1989. — 41 с.
9. Орлов А.И. Математика случая. Вероятность и статистика – основные факты: Учебное пособие. – М.: МЗ-Пресс, 2004. – 110 с.
10. Чирков В.П. Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / В. П. Чирков. — М.: Маршрут, 2006. — 620 с.
11. Чирков В.П. Основы теории проектирования строительных конструкций. Железобетонные конструкции: учебное пособие для вузов / В.П. Чирков, В.И. Клюкин, В.С. Федоров, Я.И. Швидко; под редакцией В.П. Чиркова – М.: 1999. – 376 с.
12. Шестериков В. И. Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов / В. И. Шестериков. — М.: Росавтодор, 2002. – 140 с.
13. Muraleedharan G., Soares C.G. [Characteristic and Moment Generating Functions of Generalised Pareto (GP3) and Weibull Distributions](http://dx.doi.org/10.9734/JSRR/2014/10087) / Journal of Scientific Research and Reports, 2014, Т. 3 (14): 1861–1874.
14. Kristaps Gode. Predicting the Service Life of Concrete Bridges Based on Quantitative Research. Construction Science 2014/15: Riga Technical University, 2014.
15. Rostam, S. Service life design of concrete structures – a challenge to designers as well to owners. Asian Journal of Civil Engineering, Tehran: Building and Housing Research Center, 2005, Vol. 6.

# REFERENCES

1. *Aktuganov I.Z.* Metodika ocenki vlijanija klimaticheskih temperaturno-vlazhnostnyh vozdejstvij na jekspluatacionnuju nadezhnost' i dolgovechnost' betona stroitel'nyh konstrukcij [Method for assessing the effect of climatic temperature and humidity on the operational reliability and durability of concrete in building structures]. Novosibirsk: ‘STU’ Publ., 2005. 76 p. (rus)
2. *Bokarev S.A., Efimov S.V.* O normirovanii vysoty prodol'nogo borta zhelezobetonnyh proletnyh stroenij s ezdoj na ballaste[About standardizing the height of the longitudinal side of reinforced concrete superstructures of riding on the ballast]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija.* 2016. No 2. Pp. 10-19. (rus)
3. *Vasil'ev A.I.* Ocenka tehnicheskogo sostojanija mostovyh sooruzhenij: uchebnoe posobie [Assessment of technical condition of bridge structures: a training manual]. Moscow: ‘Knorus’ Publ., 2017. 256 p. (rus)
4. Instrukcija po ocenke sostojanija i soderzhanija iskusstvennyh sooruzhenij na zheleznyh dorogah Rossijskoj Federacii [Instruction on the assessment of the state and content of artificial structures on the railways of the Russian Federation]. Moscow, 2006. 120 p. (rus)
5. *Iosilevskij L.I.* Prakticheskie metody upravlenija nadezhnost'ju zhelezobetonnyh mostov [Practical methods of managing the reliability of reinforced concrete bridges]. Moscow: centre ‘Inzhener’ Publ., 1999. 295 p. (rus)
6. *Iosilevskij L.I., Fedulov I.V.* Prognozirovanie srokov sluzhby zhelezobetonnyh proletnyh stroenij [Forecasting the service life of reinforced concrete superstructure]. *Way and track economy.* 1997. No 8. Pp.11 – 14. (rus)
7. *Levin B.R. (Ed.)* Spravochnik po nadezhnosti [Reliability Handbook]. Moscow: ‘Mir’ Publ., 1969. 339 p. (rus)
8. *Mamazhanov R. K.* Osnovy teorii prognozirovanija resursa zhelezobetonnyh mostov dlja Srednej Azii: avtoref. dis. … d-ra. teh. nauk: 05.23.11 [Fundamentals of the theory of forecasting the resource of reinforced concrete bridges for Central Asia: author's abstract. dis. ... dr. those. Sciences: 05.23.11]. Moscow: ‘CNIIS’ Publ., 1989. 41 p. (rus)
9. *Orlov A.I.* Matematika sluchaja. Verojatnost' i statistika – osnovnye fakty [Mathematics of the case. Probability and statistics - basic facts]. Moscow: ‘MZ-Press’ Publ., 2004. 110 p. (rus)
10. *Chirkov V.P.* Prikladnye metody teorii nadezhnosti v raschetah stroitel'nyh konstrukcij [Applied methods of reliability theory in calculations of building structures]. Moscow: ‘Marshrut’ Publ., 2006. 620 p. (rus)
11. *Chirkov V.P.* Osnovy teorii proektirovanija stroitel'nyh konstrukcij. Zhelezobetonnye konstrukcii [Fundamentals of the theory of design of building structures. Reinforced concrete structures]. Moscow: 1999. 376 p. (rus)
12. *Shesterikov V. I.* Metodika raschetnogo prognozirovanija sroka sluzhby zhelezobetonnyh proletnyh stroenij avtodorozhnyh mostov [Methods of predicting the design service life of reinforced concrete superstructures of highway bridges]. Moscow. 2002. 140 p. (rus)
13. *Muraleedharan G.,* Soares C.G. [Characteristic and Moment Generating Functions of Generalised Pareto (GP3) and Weibull Distributions](http://dx.doi.org/10.9734/JSRR/2014/10087)*, Journal of Scientific Research and Reports.* 2014. V. 3 (14). Pp.1861–1874.
14. *Kristaps Gode.* Predicting the Service Life of Concrete Bridges Based on Quantitative Research. Riga Technical University, 2014.
15. *Rostam S.* Service life design of concrete structures – a challenge to designers as well to owners, *Asian Journal of Civil Engineering, Tehran: Building and Housing Research Center*. 2005. V. 6.

**Сведения об авторах**

*Бокарев Сергей Александрович*, докт. техн. наук, профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, BokarevSA@stu.ru

*Прибытков Сергей Сергеевич*, канд. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, pss@stu.ru

*Ефимов Стефан Васильевич*, аспирант кафедры «Мосты», Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, esv@sgups.net

**Authors Details**

*Bokarev Sergey Aleksandrovich*, DSc, Professor, Siberian State Transport University, 191, Str. D. Kovalchuk, 630049, Novosibirsk, Russia, BokarevSA@stu.ru

*Pribytkov Sergey Sergeevich*, PhD, A/Professor, Siberian State Transport University, 191, Str. D. Kovalchuk, 630049, Novosibirsk, Russia, pss@stu.ru

*Efimov Stefan Vasil'evich*, Post-graduate student, Siberian State Transport University, 191, Str. D. Kovalchuk, 630049, Novosibirsk, Russia, esv@sgups.net