

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

УДК 624.271 / 69.059.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-5-185-197

С.А. БОКАРЕВ, И.В. ЗАСУХИН,

Сибирский государственный университет путей сообщения

К ВОПРОСУ О ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАССИВНЫХ ОПОР МОСТОВ

В статье приведены данные о распространенности и сроках эксплуатации массивных опор железнодорожных мостов на сети ОАО «РЖД». Дана динамика роста неисправностей опор железнодорожных мостов. Показано развитие нормативных документов в части оценки технического состояния опор, их долговечности на железнодорожных мостах. Дано описание существующего способа определения остаточного ресурса мостовых сооружений на автомобильных дорогах. Приведены сведения о пороговых значениях предотказа конструкции. Выполнены расчеты остаточного ресурса промежуточной железнодорожной опоры из бутовой кладки, проведено сравнение остаточного срока службы опоры по двум нормативным методикам. Определены их сходства и различия, по результатам сравнения выявлены их основные недостатки. Сделаны предложения по уточнению параметров неисправностей, приведенных в действующем нормативном документе по оценке технического состояния искусственных сооружений на железных дорогах. Для обработки статистических данных о развитии неисправностей железнодорожных мостов и прогнозирования их развития показана разработанная в СГУПС модель, основанная на полумарковском процессе. Указаны возможные источники данных для построения такой модели. Приведена альтернативная модель оценки надежности мостовых конструкций. Сформулированы цель дальнейших исследований и задачи, которые необходимо решить для достижения этой цели.

Ключевые слова: массивные опоры мостов; неисправности опор; надежность; долговечность; остаточный ресурс; износ.

Для цитирования: Бокарев С.А., Засухин И.В. К вопросу о долговечности массивных опор мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 5. С. 185–197.

S.A. BOKAREV, I.V. ZASUKHIN,
Siberian State Transport University

REVISITING DURABILITY OF BRIDGE SOLID PIERS

The paper presents data on the prevalence and service life of solid piers of railroad bridges of the Russian Railways. The dynamics of solid pier damages, the development of normative documents on assessing their technical conditions and durability, and methods of assessing the residual life of bridge structures are shown herein. Information on the threshold values of failure is also given. The residual life of the intermediate masonry support is analyzed and estimated using two standard techniques. Their similarities and differences are determined and their limitations are compared. Proposals are made to clarify the damage parameters described in the current normative document for assessing the technical condition of railway structures. For statistical data processing in relation to bridge damages and prediction of their development, a model is proposed on the basis of semi-Markovian process. Possible data sources for constructing such a model are indicated. An alternative model for estimating the reliability of bridge structures is shown.

Keywords: solid pier; damage; reliability; durability; residual life; deterioration.

For citation: Bokarev S.A., Zasukhin I.V. K voprosu o dolgovechnosti massivnykh opor mostov [Revisiting durability of bridge solid piers]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 5. Pp. 185–197.

Строительство железных дорог, а вместе с ними и мостовых сооружений в России начали в 30-х гг. XVIII в. [1]. В настоящее время на сети железных дорог ОАО «РЖД» эксплуатируется более 80 тыс. опор мостов, из которых около 76 % представлены массивными монолитными конструкциями, преимущественно из бутовой кладки, бетона и бутобетона. Это связано в первую очередь с тем, что остальные конструктивные формы начали широко применять во второй половине XX в., в то время как большинство действующих железнодорожных мостов было уже возведено. Согласно «Техническим условиям на проведение планово-предупредительных ремонтов инженерных сооружений железных дорог России», ЦП-622 и «Инструкции по содержанию искусственных сооружений» ЦП-628, предусмотрен капитальный ремонт каменных, бетонных, бутобетонных и железобетонных опор с разборкой существующих и сооружением новых через 80–100 лет после постройки сооружения. Однако на сегодняшний день на сети железных дорог ОАО «РЖД» эксплуатируется большое количество массивных опор, построенных более 100 лет назад (35 %). На рис. 1 показано распределение массивных опор железнодорожных мостов по сроку эксплуатации в зависимости от материала кладки. Информация получена из базы данных «Единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой ИССО» (ЕК АСУИ ИССО).

В процессе эксплуатации в результате воздействия различных техногенных и природно-климатических воздействий у опоры появляются повреждения. Обеспечение должной надежности и долговечности мостовых опор требует проведения периодических работ по выявлению неисправностей и их устранению. При отсутствии таких работ состояние объекта ухудшается вплоть до возникновения отказа. Согласно заключению Технической экспертизы состояния искусственных сооружений, в региональных дирекциях инфраструктуры по материа-

лам, поступившим на 01.01.2017 г. за период 2008–2016 гг. включительно, отмечено увеличение дефектности опор железнодорожных мостов в 1,8 раза – с 259,7 до 468,21 тыс. м³. Изменение дефектности опор по годам показано на рис. 2.

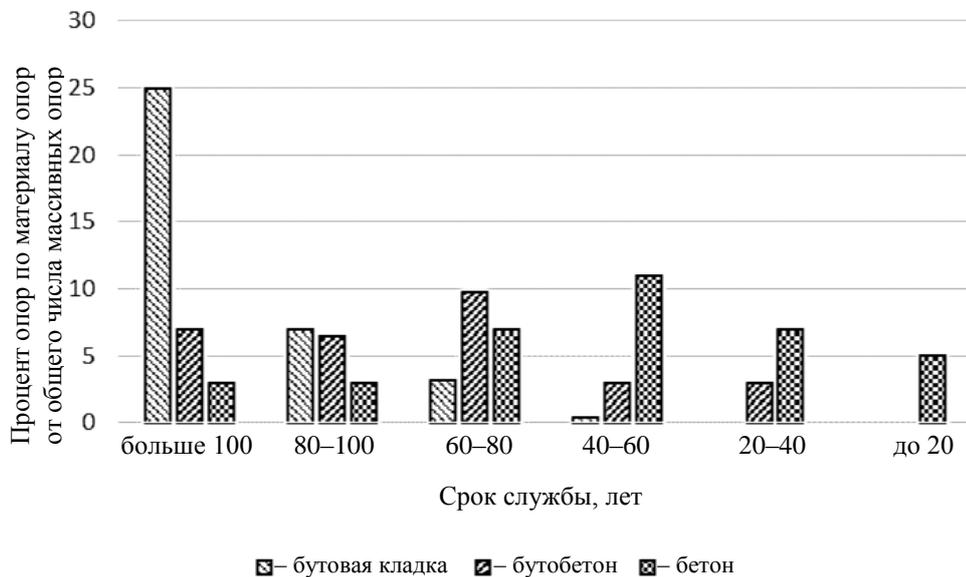


Рис. 1. Распределение массивных опор эксплуатируемых железнодорожных мостов по сроку эксплуатации в зависимости от материала

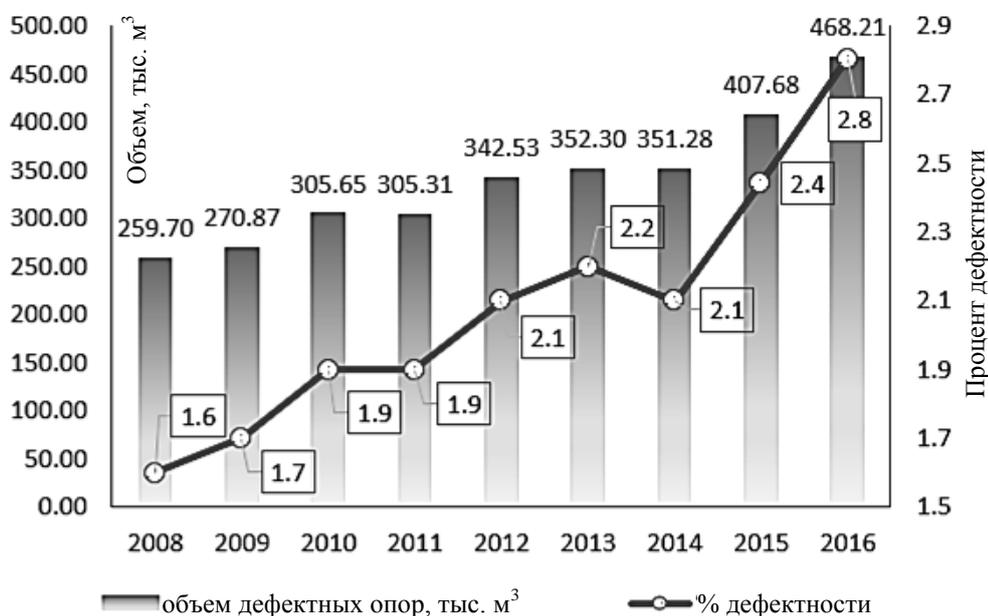


Рис. 2. Динамика изменения дефектности опор железнодорожных мостов с 2008 по 2016 г.

Анализ нормативных документов по оценке долговечности мостовых сооружений

Массовое обследование железнодорожных опор с целью исследования влияния неисправностей на их техническое состояние было выполнено в 1966–1968 гг. [2]. Сотрудниками НИИ Мостов в 1967 г. было разработано предложение по оценке технического состояния опор в зависимости от характера и степени развития различных неисправностей, выявленных при осмотрах и обследованиях. В 1968 г. на основании замечаний мостообследовательских организаций и анализа результатов опытного применения этих предложений методика была переработана. При этом было изучено 600 отчетов мостоиспытательных станций Главного управления пути МПС и дорог об обследовании 2800 опор. Кроме того, сотрудники НИИ Мостов провели обследования еще 50 опор на Западно-Сибирской и Восточно-Сибирской дорогах. Результаты исследований вошли в «Методические указания по оценке технического состояния и определению износа искусственных сооружений железных дорог» 1971 г.

В настоящее время оценку технического состояния опор осуществляют по результатам обследования опор по «Инструкции по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации» [3], как правило, используя ЕК АСУИ ИССО. В зависимости от категорий обнаруженных дефектов по долговечности согласно [3, прил. 2] можно рассчитать относительный остаточный срок службы сооружения. Дополнительным критерием для оценки надежности функционирования искусственных сооружений, и в частности опор, является определение нахождения объекта в состоянии отказа или предотказного состояния согласно «Классификатору и нормам пороговых значений критических параметров, характеризующих предотказное состояние искусственных сооружений» [4]. Причиной возникновения предотказного состояния могут быть трещины, «дышащие» при проходе временной нагрузки, изломы подферменных камней, вывалы камней или блоков из тела опоры или ледорезов, отрыв обратных стенок устоев. Однако действующие нормативные документы [3, 4] не позволяют в полной степени прогнозировать развитие неисправностей, не учитывают изменение физико-механических и химических свойств кладки. Например, неисправное состояние сливов, глубокое разрушение раствора в швах облицовки или наличие стабильных трещин обычно не влияет на безопасную эксплуатацию сооружения, однако приводит к интенсивному развитию повреждений, связанных с проникновением и замерзанием влаги в глубине кладки. На рис. 3 показана «дышащая» сквозная трещина в подферменной плите промежуточной опоры, через которую влага попадает внутрь кладки тела опоры, вызывая коррозионные процессы и, как следствие, снижение остаточного ресурса.

Для определения долговечности мостовых сооружений на автомобильных дорогах используют ОДМ 218.0.018–05 [5]. Предложенная методика определения износа [6] учитывает имеющиеся дефекты и повреждения, степень их развития и распространенность. Процент износа по данному нормативному документу можно использовать для количественной оценки измене-

ния состояния конструкций и элементов, а также планирования работ по содержанию, ремонту, капитальному ремонту, модернизации и реконструкции мостовых сооружений. На рис. 4 изображена зависимость уровня износа от времени эксплуатации сооружения и соответствующие ремонтные работы для каждой категории состояния. Всего рассмотрено 5 основных категорий состояния сооружения.



Рис. 3. «Дышащая» сквозная трещина в подферменной плите промежуточной опоры

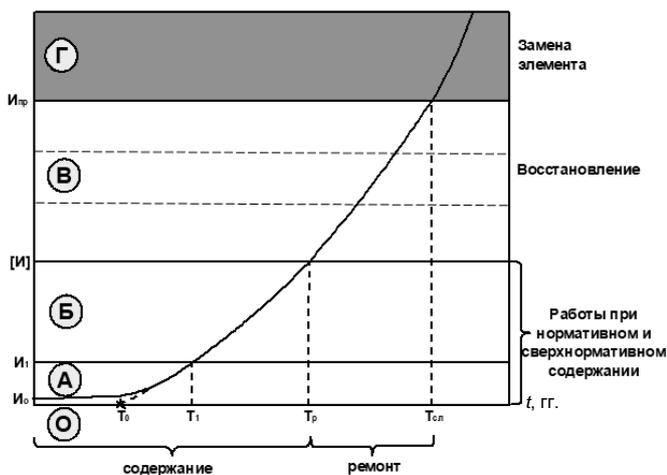


Рис. 4. Категории состояния элементов по ОДМ 218.0.018–05

Характер физического износа автодорожных и железнодорожных промежуточных массивных опор практически не имеет отличий. Для оценки долговечности опоры из бутовой кладки железнодорожного моста, построенной в 1935 г., выполнен расчет остаточного срока службы сооружения по Инструкции [3] в соответствии с неисправностями, представленными в каталоге

дефектов (табл. 1), и по ОДМ 218.0.018–05 [5] с теми же неисправностями, представленными в табл. 2.

Таблица 1

Неисправности опоры по Инструкции [3]

| Неисправность, местоположение развития дефекта | Категория дефекта | Фотография |
|---|----------------------|--|
| Скол опорного камня в месте опирания железобетонного пролетного строения по первому пути | Б2 Д2 Г2 Р2 |  |
| Натекание на поверхность опорного камня с железобетонного пролетного строения по второму пути (образование сталактитов) | Б0 Д1 Г0 Р1 |  |
| Сеть поверхностных трещин на подферменной плите и подферменниках в зонах опирания металлического пролетного строения второго пути | Б0 Д1 Г1 Р1 |  |
| Трещины и пустоты в швах облицовочных камней | Б2 Д2 Г2 Р2 |  |

Таблица 2

Неисправности опоры согласно ОДМ 218.0.018–05

| Вид повреждения | Неисправности | Износ по участкам | | |
|-------------------------------|--|---|--------------------|------|
| | | Ригель | Подфер- менники | Тело |
| Разрушение бетона | Разрушение бетона на глубину 10 см | | 12 | |
| Дефекты поверхности | Интенсивное выщелачивание с образованием сталактитов | 3 | 10 | |
| Трещины | Трещины несилового характера на площади > 50 % | 10 | 10 | |
| Разрушение швов кладки | Вынос заполнителя | | | 6 |
| Суммарный износ по участкам | | 13 | 32 | 6 |
| Коэффициенты весомости | | 0,4 | 0,6 | 1 |
| Осредненный показатель износа | | $13 \cdot 0,4 + 32 \cdot 0,6 + 6 \cdot 1 = 30,4 \%$ | | |

Согласно Инструкции [3], балльные оценки по состоянию опоры следующие:

1. По безопасности: $K_6^{\text{согт}} = 3,5 - 1 \cdot 0,2 = 3,3$.
2. По долговечности: $K_d^{\text{согт}} = K_{d-\text{баз}}^{\text{согт}} = 3$.
3. По грузоподъемности: $K_d^{\text{согт}} = K_{d-\text{баз}}^{\text{согт}} = 3$.
4. По ремонтпригодности: $K_d^{\text{согт}} = 3,5 - (2 \cdot 0,07 + 1 \cdot 0,3) = 3,06$.

Балльная оценка по состоянию $K_{\text{пр}}^{\text{согт}} = 3,3$. Показатель качества по состоянию удовлетворительный.

Относительный остаточный срок службы опоры согласно [3, табл. П.2.4] составляет 24 г. (25 % от нормативного значения) до капитального ремонта, показатель качества по долговечности оценивается как удовлетворительный.

Согласно рекомендациям [5], значение износа элемента (частный износ) I_i определяется как процент утраты основных первоначальных качеств (функций). Критерии оценки нарушения своих функций у каждого элемента различны в соответствии с назначением этого элемента. Осреднённый показатель износа учитывает весомость отдельных элементов конструкции и показывает её общий износ.

Фактический срок службы составляет $T_c = 83$ г. В табл. 3 приведен расчет остаточного срока службы опоры и соответствующая ему категория состояния элемента. $T_{\text{ф}}$ получен по графику долговечности опор [5, прил. 2]. Относительный остаточный срок службы опоры согласно ОДМ 218.0.018–05 [5] на 11 лет больше, чем по Инструкции [3]. Однако при категории состояния сооружения «В» восстановление элемента экономически нецелесообразно,

т. к. требует проведения капитального ремонта. Согласно распоряжению ОАО «РЖД» от 30.12.2010 № 2795р «О введении в действие Указаний о классификации работ по восстановлению инженерных сооружений ОАО «РЖД» п. 3.1, такие работы, как ремонт сливов подферменных площадок, расшивка швов облицовки, заделка отколов, пустот и восстановление защитного слоя железобетонных и бетонных поверхностей сооружений, выполняют в рамках работ по текущему содержанию искусственных сооружений.

Таблица 3

Ресурс опоры согласно ОДМ 218.0.018–05

| Износ, % | Срок службы, лет | | Остаточный срок службы, лет | | Категория состояния |
|----------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| | Фактический $T_{\text{ф}}$ | Предельный $T_{\text{пред}}$ | Требуемый $T_{\text{от}}$ | Фактический $T_{\text{оф}}$ | |
| 30,4 | 45 | 100 | 17 | 35 | В |

Анализ методики [5, 6] позволил выявить ряд ее принципиальных несовершенств, и прежде всего нецелесообразность назначения того или иного вида ремонтных работ. При расчете износа мостового сооружения определено, что ряд незначительных дефектов может быть устранен в рамках текущего содержания, хотя суммарный износ указывает на необходимость проведения капитального ремонта. Преимуществом Инструкции [3] по сравнению с ОДМ [5] является то, что виды ремонтных работ конкретизированы для разных дефектов.

Методика, приведенная в документах [5, 6], дает средневзвешенную оценку износа объекта, не отражая его способность выполнять свои функции. Никак не учитывается грузоподъемность сооружения и его отдельных элементов. Данный подход применим только тогда, когда расчетная несущая способность элемента равна или немного превышает усилия, создаваемые расчетной нагрузкой. Таким образом, при значительных превышениях класса элемента над классом нагрузки (даже перспективной) использовать такой подход не имеет смысла. В то же время хотя несущая способность обеспечена, но необходимость проведения ремонтных работ, например при вывале камней в облицовке опор, не находит отражения в рассматриваемой методике. Также методика [5, 6] не учитывает тот факт, что некоторые неисправности могут развиваться за небольшой промежуток времени и в дальнейшем их развитие не происходит. Например, в какой-то момент под путепроводом произошел удар транспортного средства по железобетонной опоре, приведший к сколу защитного слоя бетона и обнажению рабочей арматуры в опоре. За короткий период времени произошло сильное повреждение, однако дальнейшее его развитие будет основано на других физических процессах. Однако по методике [5] прогноз остаточного срока службы будет необоснованно пессимистичным. Еще одним примером может служить осадка опоры, которая через некоторый промежуток времени стабилизировалась, и дальнейшего движения грунтового массива не произошло.

Стоит отметить, что пороговые значения предотказа элементов массивных опор, согласно [4 и 5], аналогичны. Однако ОДМ 218.0.018–05 для опре-

деления процента износа элемента с отдельными неисправностями рассматривает больше параметров, чем Инструкция [3]:

– для таких неисправностей, как крен опоры, размывы русла, процент износа зависит от типа фундамента (мелкого заложения или свайный) и вида грунтов, слагающих дно;

– деградационное разрушение бетона рассмотрено отдельно для сжатой и растянутой зоны;

– при наличии трещин процент износа зависит от величины раскрытия, длины и шага опор.

Для корректной оценки технического состояния опор необходимо рассмотреть введение дополнительных параметров для отдельных дефектов и уточнить для них показатели надежности (безопасность, долговечность, ремонтпригодность) в сравнении с тем, что было сделано в Инструкции [3]. Кроме того, при разрушении поверхности как локального, так и массового характера должно быть учтено месторасположение повреждения. Например, повреждение бетона в местах сопряжения элементов более опасно, чем в монолите, а разрушение раствора в швах кладки или вывалы отдельных камней облицовки ледорезов могут создать угрозу разрушения опоры при ледоходе.

Современные концепции по оценке надежности опор мостов

Большое число исследований по вероятностным моделям износа было проведено американскими учеными. Балльная оценка элемента, полученная через визуальный осмотр, не является основополагающей для гарантии обеспечения безопасности из-за наличия значительного количества дефектов, не видимых во время обследования [7]. Мостовые сооружения необходимо моделировать как системы независимых или схожих компонентов. Поскольку отказ одного компонента обычно не приводит к разрушению общей структуры мостов, необходимо моделировать комбинации компонентов, связанные последовательно или параллельно. В зависимости от конкретной модели определяется оптимальная стратегия технического обслуживания сооружения [8].

Для расчета надежности мостовых сооружений в Соединенных Штатах Америки используется множество подходов при моделировании систем, однако самый популярный – стохастический подход [9]. Такие модели распределения случайных величин и вероятностей хорошо применять для прогнозирования ухудшения состояний с течением времени. Модели, основанные на цепях Маркова, используют с 1989 г. [10]. Марковский подход обусловлен возможностью перехода из одного состояния в другое [11, 12]. Данные состояния обозначаются индексами. Согласно ГОСТ 32192–2013 «Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия, термины и определения», существует 5 состояний: исправное, неисправное, предотказное, частично работоспособное и неработоспособное. Основным преимуществом такой модели является возможность прогнозирования перехода сооружения между любыми 5 состояниями, учитывать не только ухудшение состояния конструкций в результате деградационных процессов, но и улучшение вследствие проведенных ремонтных работ.

В настоящее время в СГУПС разработана методика по оценке надежности железнодорожных искусственных сооружений на основе полумарковских процессов. Для определения частоты и интенсивности возникновения неисправностей и, как следствие, перехода из лучшего состояния в худшее следует использовать эксплуатационную документацию и данные «Единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой ИССО» (ЕК АСУИ ИССО).

Однако марковский подход имеет ряд ограничений. Для оценки вероятности перехода сооружения из одного состояния в другое необходимо иметь достаточное количество статистических данных о всех изменениях в состоянии конструкции. Однако более $1/3$ всех массивных опор эксплуатируют уже более 100 лет, и в настоящее время невозможно отследить весь их жизненный цикл. Для подобных конструкций необходимо дополнять статистические данные экспертными оценками, которые могут быть ошибочными из-за того, что таким образом невозможно учесть проведенные ремонтные работы, которые улучшали состояние опор.

Еще одной альтернативой марковских моделей могут стать сети Петри. Их все чаще применяют в области транспорта, производства и бизнеса для моделирования динамических распределённых систем [13]. Подобные модели уже широко используют в Америке для имитации многих сложных процессов [9].

Кроме статистических данных для прогнозирования остаточного ресурса опор в обеих моделях необходимо использовать модели деградации материалов. Проблеме влияния климатических и температурных воздействий на долговечность бетона посвящены труды В.С. Гладкова [14], С.В. Шестоперова [15], Ф.М. Иванова [16] и других. Алмазов В.О. [17], Л.М. Добшиц [18] и И.З. Актуганов [19] занимались исследованием транспортных сооружений и пришли к выводу, что в качестве зависимой переменной в регрессионной модели деградации бетона необходимо принимать изменение его прочности в процессе попеременного замораживания и оттаивания влаги в порах. Этот вывод соотносится с данными о том, что наибольшее количество неисправностей опор возникает в руслах водоемов на участках контакта «воздух-вода». Однако все перечисленные исследования выполнены на бетонных и железобетонных конструкциях и не рассматривают долговечность бутобетонной кладки или раствора при его совместной работе с камнем, что требует доработки существующих методик для оценки опор мостов из различных видов кладки.

Целью дальнейших исследований является разработка методики оценки долговечности опор железнодорожных мостов по достоверной модели надёжности. Анализ существующих методов оценки долговечности эксплуатируемых опор мостов показал, что для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- уточнить влияние локализации обнаруженных неисправностей на параметры надёжности сооружения;
- уточнить граничные параметры неисправностей при определении категории состояния сооружения;
- провести сбор статистических данных для определения частоты и интенсивности развития неисправностей в опорах;

– выполнить исследования математических моделей деградации бутовой кладки и бетона с учетом особенности конструкции и возможного развития неисправностей и выбрать оптимальную;

– рассмотреть возможность использования сети Петри для уточнения моделей надежности опор мостов при недостаточном количестве статистических данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Николаи Л.Ф.* Мосты: крат. руководство. 4-е изд. СПб.: Тип. Ю.Н. Эрлих, 1907. 509 с.
2. *Исследования по повышению долговечности опор мостов.* Разработка указаний о порядке обследования и оценки состояния опор мостов / НИИ мостов; рук. П.Е. Помогаев; исполн.: Н.Н. Попов, В.А. Марихин, В.П. Овчинникова. Л., 1968. 46 с.
3. *Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации /* Департамент пути и сооружений ОАО «РЖД». М., 2006. 120 с.
4. *Классификатор и нормы пороговых значений критических параметров,* характеризующих предотказное состояние искусственных сооружений. М., 2017. 192 с.
5. *ОДМ 218.0.018–05.* Определение износа конструкций и элементов мостовых сооружений на автомобильных дорогах. М., 2005. 159 с.
6. *Шестериков В.И.* Оценка и прогнозирование состояния мостов на автомобильных дорогах в системе управления их эксплуатацией: дис. ... докт. техн. наук. М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 2004. 314 с.
7. *Fangopol D.M., Kong J.S., Gharaibesh E.S.* Reliability-based life-cycle management of highway bridges // *J Comput Civil Engng, ASCE.* 2001. 15 (1). P. 147–57.
8. *Seung-Ie Yang, Dan M. Frangopol, Luis C. Neves.* Service life prediction of structural systems using lifetime functions with emphasis on bridges // *Reliability Engineering and System Safety* 2004. 86. P. 39–51.
9. *Yianni Panayioti C., Rama Dovile, Neves Luis C., Andrews John D., Castlo David.* A Petri-Net-based modelling approach to railway bridge asset management // *Structure and Infrastructure Engineering.* 2016. 13 (2). P. 287–297.
10. *Jiang Y., Sinha K.C.* Bridge service life prediction model using the Markov chain // *Transportation Research Record.* 1989. 1223. P. 24–30.
11. *Боровик Г.М.* Моделирование и прогнозирование показателей эксплуатационной надежности искусственных сооружений в условиях сурового климата. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2005. 182 с.
12. *Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.* Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 363 с.
13. *British Standards Institution.* Systems and software engineering. High-level Petri nets. Concepts, denitions and graphical notation. Tech. rep., British Standards Institution. 2004.
14. *Гладков В.С.* О морозостойкости бетона // *Бетон и железобетон.* 1990. № 3. С. 9–11.
15. *Шестоперов С.В.* Долговечность бетона. М.: Автотрансиздат, 1960. 438 с.
16. *Иванов Ф.М.* Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
17. *Алмазов В.О., Серенко Н.А.* Учет климатических воздействий при проектировании и прогнозе долговечности железобетонных пролетных строений // *Автомоб. дороги: информ. сб. / Информавтодор.* 1997. № 1. С. 18–28.
18. *Добшиц Л.М.* Морозостойкость бетонов транспортных сооружений и пути ее повышения: дис. ... докт. техн. наук. М., 2000. 385 с.
19. *Актуганов И.З.* Методика оценки влияния климатических температурно-влажностных воздействий на долговечность бетона строительных конструкций. Расчетный метод определения требований к морозостойкости бетона. Новосибирск: НГТУ, 2008. 388 с.

REFERENCES

1. *Nikolai L.F.* Mosty: krat. ruk. [Bridge manual]. 4th ed. St.-Petersburg: Yu.N. Erlikh, 1907. 509 p. (rus)
2. *Popov N.N., Marihin V.A., Ovchinnikova V.P.* Issledovaniya po povysheniyu dolgovechnosti opor mostov. Razrabotka ukazaniy o poryadke obsledovaniya i ocenki sostoyaniya opor mostov [Durability improvement of bridge supports. Development of guidelines on inspection and assessment of bridge supports] Leningrad, 1968. 46 p. (rus)
3. *Instrukciya po sodержaniyu iskusstvennyh sooruzhenij CP-628* [Instruction on artificial structure maintenance]. Moscow: Transport, 1998. 36 p. (rus)
4. *Klassifikator i normy porogovyh znachenij kriticheskikh parametrov, harakterizuyushchih predotkaznoe sostoyanie iskusstvennyh sooruzhenij* [Classifier and norms of threshold values of critical parameters of pre-failure state of artificial structures]. Moscow, 2017. 192 p. (rus)
5. *ODM 218.0.018–05. Opredelenie iznosa konstrukcij i ehlementov mostovyh sooruzhenij na avtomobil'nyh dorogah* [Wear of bridge structures and elements]. Moscow, 2005. 159 p. (rus)
6. *Shesterikov V.I.* Ocenka i prognozirovaniye sostoyaniya mostov na avtomobil'nyh dorogah v sisteme upravleniya ih ehkspluatatsiej dis. ... d-ra tekhn. nauk [Estimation and forecasting bridge state of on highways in management system of their operation. DSc Thesis]. Moscow, 2004. 314 p. (rus)
7. *Fangopol D.M., Kong J.S., Gharaibesh E.S.* Reliability-based life-cycle management of highway bridges. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2001. V. 15. No. 4. Pp 147–57.
8. *Seung-Ie Yang, Dan M. Frangopol, Luis C. Neves.* Service life prediction of structural systems using lifetime functions with emphasis on bridges. *Reliability Engineering and System Safety*. 2004. V. 86. Pp. 39–51.
9. *Yianni Panayioti C., Rama Dovile, Neves Luis C., Andrews John D., Castlo David.* A Petri-Net-based modelling approach to railway bridge asset management. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2016. V. 13. No. 2. Pp. 287–297.
10. *Jiang Y., Sinha K.C.* Bridge service life prediction model using the Markov chain. *Transportation Research Record*. 1989. V. 1223. Pp. 24–30.
11. *Borovik G.M.* Modelirovaniye i prognozirovaniye pokazatelej ehkspluatatsionnoj nadezhnosti iskusstvennyh sooruzhenij v usloviyah surovogo klimata [Modeling and forecasting of indicators of operational reliability of artificial structures in severe climatic conditions]. Khabarovsk: DVGUPS, 2005. 182 p. (rus)
12. *Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'v A.D.* Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti [Mathematical methods in the theory of reliability]. Moscow: Nauka, 1965. 363 p. (rus)
13. *British Standards Institution.* Systems and software engineering. High-level Petri nets. Concepts, denitions and graphical notation. Tech. rep., British Standards Institution, 2004.
14. *Gladkov B.C.* O morozostojkosti betona [Frost resistance of concrete]. *Beton i zhelezobeton*. 1990. No. 3. Pp. 9–11. (rus)
15. *Shestoperov S.V.* Dolgovechnost' betona [Durability of concrete]. Moscow: Avtotransizdat, 1960. 438 p. (rus)
16. *Ivanov F.M.* Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnyh sredah [Durability of reinforced concrete in corrosive environments]. Moscow: Stroiizdat, 1990. 320 p. (rus)
17. *Almazov V.O., Serenko N.A.* Uchet klimaticheskikh vozdeystvij pri proektirovanii i prognoze dolgovechnosti zhelezobetonnyh proletnyh stroenij [Climatic influence on design and forecast of steel structure durability]. *Informavtodor*. 1997. V. 1. Pp. 18–28. (rus)
18. *Dobshic L.M.* Morozostojkost' betonov transportnyh sooruzhenij i puti ee povysheniya, diss. ... d-ra tekhn. nauk [Concrete frost resistance of transport structures and its improvement. DSc Thesis]. Moscow, 2000. 385 p. (rus)
19. *Aktuganov I.Z.* Metodika ocenki vlijanija klimaticheskikh temperaturno-vlazhnostnyh vozdeystvij na jekspluatatsionnuju nadezhnost' i dolgovechnost' betona stroitel'nyh konstrukcij [Estimation of climatic temperature and humidity effects on concrete durability of building structures.]. Novosibirsk: NGTU, 2008. 388 p. (rus)

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

Засухин Илья Витальевич, аспирант, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, zasukhiniv@mail.ru

Authors Details

Sergey A. Bokarev, DSc, Professor, Siberian State Transport University, 191, Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, BokarevSA@stu.ru

Ilya V. Zasukhin, Research Assistant, Siberian State Transport University, 191, Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, zasukhiniv@mail.ru