

Огурцов Глеб Леонидович

**Методы прогнозирования показателей надежности пролетных
строений железобетонных мостов**

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и
транспортных тоннелей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **Ермошин Николай Алексеевич**
доктор военных наук, профессор

Официальный оппонент: **Белый Андрей Анатольевич**
доктор технических наук, доцент, технический директор,
ООО «К2 Инжиниринг», г. Москва

Шестовицкий Дмитрий Александрович
кандидат технических наук, доцент, технический директор,
ООО «НИПИ ТрансСтройбезопасность», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «15» сентября 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета У.2.1.8.53 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус ГК-2, аудитория 411).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.2.1.8.53, д.т.н., доцент



Баденко В.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Рост уровня автомобилизации населения и объемов автомобильных перевозок; снижение уровня технического состояния и износ дорожных сооружений из-за некачественного содержания и несвоевременного ремонта; недооценка роли обеспечения требуемой надежности при их проектировании, строительстве и эксплуатации; недостаточное финансирование мероприятий развития транспортной инфраструктуры являются причинами возникновения критических отказов в работе искусственных сооружений на дорогах с значительными социально-экономическими ущербами. В особенности это касается автодорожных мостов, что характерно не только для России, но и других стран мира.

Для обеспечения безопасной работы мостовых сооружений и их надежности необходимо повышение качества проектирования, строительства, реконструкции, ремонта и содержания с учетом стохастичности условий эксплуатации и факторов износа. Высокая степень риска отказов в работе конструктивных элементов железобетонных мостов во многих случаях обусловлена снижением показателей прочности и деформативности материалов, что уменьшает несущую способность пролетного строения. В значительной степени это происходит в следствие депассивации защитного слоя бетона и последующей коррозии арматуры, которые вызваны воздействием диффузии атмосферных газов и других внешних факторов, а также ненадлежащим содержанием мостов, недостатками при изготовлении конструктивных элементов и их проектировании.

Рассмотренные обстоятельства свидетельствуют о необходимости проведения теоретических и экспериментальных исследований в области обеспечения надежности пролетных строений железобетонных мостов. Решение этой задачи требует научного обоснования показателей безотказности и долговечности пролетного строения в зависимости от интенсивности и состава транспортных потоков, воздействия агрессивных сред, физико-механических характеристик конструкционных материалов, технологий производства конструктивных элементов.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами обеспечения рассматриваемых показателей надежности в промышленно-гражданском и транспортном строительстве занимались А.Р. Ржаницын, Н.С. Стрелецкий, В.В. Болотин, И.А. Золотарь, С.А. Бокарев, Л.И. Иосилевский, В.П. Чирков, В.О. Осипов, Р.К. Мамажанов, И.А. Ушаков, Е.С. Вентцель, А.И. Васильев, В.И. Шестериков, А.А. Белый, Д.А. Шестовицкий, В.Д. Казарновский, В.В. Столяров, М.В. Старцев, Н.Е. Кокодеева, Н.А. Ермошин, Ю.Г. Лазарев, А.Я. Башкарев, А.П. Ледяев, В.Н. Мячин, В.Н. Смирнов, С.В. Коваль, М.Н. Ерофеев, Н.А. Козак, L. Sun, C.Q. Li, W. Wu, B. Teplý, P. Konečný, D. Vorechovská, E. Bastidas-Arteaga, J. Cao, H. Zhou, X. Cao, P. Kopas, L. Jakubovičová, M. Vaško и др.

В выполненных исследованиях предлагаются методы прогнозирования сроков службы пролетного строения за счет обобщенного показателя износа,

общей оценки повреждаемости и коэффициента скорости физического износа. Разработанные методы позволяют определить остаточный срок службы пролетного строения. Однако, для их применения необходимо наличие ретроспективных данных визуально-инструментального обследования, а также наличие статистических данных о состоянии объектов-аналогов в конкретных условиях эксплуатации. В некоторых исследованиях прогнозирование сроков службы пролетных строений выполняется на основании оценки напряженно-деформированного состояния балок при агрессивном воздействии внешних сред. В качестве основного механизма деградации рассматривается коррозионное разрушение, вызванное взаимным влиянием хлоридов и углекислого газа. Вместе с тем, в теории мостостроения не в полной мере рассмотрены вопросы комплексного воздействия нагрузок и различных видов износа на надежность.

Несмотря на большое количество исследований, направленных на прогнозирование показателей надежности пролетных строений железобетонных мостов, фактические сроки их службы остаются меньше требуемых, а уровень технического состояния более чем у 44,6% мостов оценивается как ограниченно-работоспособные, предаварийные или аварийные. Сложилось противоречие между объективными потребностями практики проектирования, строительства и эксплуатации мостовых сооружений, обладающих достаточным уровнем надежности, и состоянием обоснованности и достоверности научно-методической базы решения этих вопросов. Применение известных подходов, базирующихся на детерминистических усредненных коэффициентах запаса прочности пролетных строений без учета стохастической природы факторов износа, приводит к необоснованным расходам или необеспеченности показателей надежности, а сформированный перечень превентивных мероприятий по их обеспечению оказывается малоэффективным.

Для разрешения противоречия определены цель, гипотеза, объект и предмет исследования, научная задача и частные задачи, которые необходимо было решить в диссертации.

Цель исследования состоит в разработке, апробации и реализации методов прогнозирования показателей надежности пролетных строений железобетонных мостов для увеличения межремонтных сроков и безопасности их эксплуатации.

Гипотеза заключается в том, что надежность пролетных строений железобетонных мостов должна и может быть обеспечена за счет разработки и применения методов прогнозирования динамики показателей прочности и деформативности их конструктивных элементов, а также технических и технологических решений, обеспечивающих снижение отрицательных эффектов от нагрузок, диффузии атмосферных газов и последующей коррозии арматуры.

Объектом исследования являются конструктивные элементы разрезных балочных пролетных строений железобетонных мостов и процессы их износа и разрушения от воздействия нагрузок и агрессивных сред.

Предмет исследования составляют методы, модели, методики, технические и технологические решения прогнозирования и повышения показателей надежности пролетных строений железобетонных мостов.

Научная задача исследования заключается в разработке методов прогнозирования показателей надежности пролетных строений железобетонных мостов на основе математического и имитационного моделирования динамики прочности и деформативности их конструктивных элементов с учетом стохастичности условий эксплуатации и факторов износа.

Задачи, которые необходимо было решить в ходе исследования:

1. Анализ теории и практики обеспечения требуемой надежности пролетных строений железобетонных мостов;
2. Обоснование показателей надежности пролетных строений железобетонных мостов;
3. Разработка методов прогнозирования показателей надежности пролетных строений железобетонных мостов;
4. Экспериментальная проверка результатов исследования и обоснование практических рекомендаций по реализации научных выводов;
5. Разработка технических и технологических решений по повышению надежности пролетных строений железобетонных мостов.

Научная новизна диссертации определяется разработкой методов прогнозирования надежности пролетных строений железобетонных мостов, *учитывающих* стохастический характер условий эксплуатации и параметров транспортного потока, взаимодействия конструктивных элементов с агрессивной внешней средой; *отличающихся* комплексным применением принципов системного подхода, методов имитационного моделирования и математической теории надежности, планирования эксперимента, теории упругости и прочности; *позволяющих* выявить закономерности влияния физико-механических и эксплуатационных характеристик конструкционных материалов, вариации нагрузок, параметров агрессивности внешней среды на срок безотказной работы сооружения, а также определить комплекс технических, технологических и организационно-экономических решений по повышению надежности пролетных строений железобетонных мостов.

Теоретическая значимость результатов диссертации заключается в том, что разработанные в ней методы прогнозирования надежности пролетных строений железобетонных мостов является дальнейшим развитием средств математического и физического моделирования работы мостовых конструкций, методов профилактики и предотвращения возможных аварий с учетом взаимосвязей конструктивных элементов, режимов эксплуатации, статического и динамического воздействия нагрузок, технологий, содержания, ремонта и реконструкции мостовых сооружений, воздействия агрессивных сред.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в возможности применения разработанных методов для снижения негативного влияния агрессивных факторов внешней среды на работу конструктивных элементов пролетных строений железобетонных мостов, прогнозирования их межремонтных сроков службы и безотказности, возможности снижения издержек на строительство, содержание, ремонт и реконструкцию мостовых сооружений за счет принятия научно-обоснованных проектных решений с учетом комплексной оценки показателей многопараметрической надежности, а также разработки практических мероприятий по увеличению срока их службы на всех стадиях жизненного цикла и снижения социально-экономического ущерба от аварий и катастроф.

Методология и методы научного исследования. В качестве теоретической и методологической основы диссертационного исследования использованы: системный анализ, математическая теория надежности, имитационное моделирование, теория планирования эксперимента, методы теории упругости и прочности, теория транспортных потоков. Информационной базой для разработки диссертации послужили многолетние данные наблюдений технического состояния пролетных строений железобетонных мостов из официальных источников, статьи в периодических изданиях, статьи в научных сборниках, монографические работы, материалы научных конференций, нормативная база технического регулирования дорожной деятельности.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Метод прогнозирования безотказности пролетных строений железобетонных мостов;
2. Метод прогнозирования долговечности пролетных строений железобетонных мостов;
3. Имитационная модель работы пролетных строений железобетонных мостов.

Апробация результатов работы. Международная конференция Архитектура и архитектурная среда: вопросы исторического и современного развития (Тюмень, Тюменский индустриальный университет, 05 июня 2020 года); Международная конференция PROCEEDINGS OF STCCE 2022 (Казань, 21–29 апреля 2022 года); Всероссийская конференция Неделя науки ИСИ, (Санкт-Петербург, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 03–09 апреля 2023 года); Международная конференция «Социотехническое строительство» (Казань, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 12 апреля 2024 года); Всероссийская конференция Неделя науки ИСИ, (Санкт-Петербург, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 01–04 апреля 2024 года). Полученные научные результаты реализованы в практической деятельности ООО «КОНКРИТЕК» (Российская

Федерация, г. Санкт-Петербург) и ООО «ВЕКТОР ПБ» (Российская Федерация, г. Санкт-Петербург), что подтверждается тремя актами реализации. Результаты исследования используются в учебном процессе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» при подготовке бакалавров и магистров.

Достоверность научных результатов обеспечивается применением известных методов теории упругости и прочности, статического моделирования, теории вероятностей и математической теории надежности, гипотезы плоских сечений, диаграмм напряженно-деформированных состояний конструкционных материалов, аналитических законов диффузии газов и коррозии арматуры, использованием реалистичных данных о состоянии мостовых сооружений, нагрузках, интенсивности и составе транспортных потоков, статистике отказов, показателей и факторов износа от воздействия агрессивных сред, а также согласованностью результатов имитационного моделирования с теоретическими и экспериментальными данными других исследований.

Вклад автора в проведенные исследования заключается в том, что он лично обосновал цели и задачи диссертации, сформулировал научную задачу диссертации, объект и предмет исследования, выносимые на защиту положения, разработал: метод прогнозирования безотказности пролетного строения железобетонных мостов; метод прогнозирования долговечности пролетных строений железобетонных мостов; имитационную модель работы пролетных строений железобетонных мостов, выполнил экспериментальную проверку результатов исследования; обосновал технические и технологические решения по обеспечению требуемых показателей надежности в условиях воздействия нагрузок и агрессивных сред.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 5 статей в научных изданиях, из них 5 статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 213 страницах машинописного текста, включающего 22 таблицы, 68 рисунков, список использованных источников из 154 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введение** рассмотрена и обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и научная задача, частные задачи исследования, определены объект и предмет исследования. Раскрыты содержание научной новизны, теоретической и практической значимости исследования, изложены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе «Анализ теории и практики обеспечения требуемой надежности пролетных строений железобетонных мостов»** проанализированы существующие модели и методы прогнозирования, а также

технические и технологические решения обеспечения надежности пролетных строений железобетонных мостов. На основе выполненного анализа выявлены следующие противоречия:

Предотвращение аварий и разрушений мостовых сооружений является актуальной задачей, обусловленной их недостаточной надежностью и безопасностью. Причинами возникновения аварийных ситуаций или преждевременных отказов являются как объективные, так и субъективные факторы (неконтролируемый износ, природные воздействия, превышение допустимой нагрузки, ошибки во время строительства, дорожно-транспортные происшествия, навал судов, ошибки проектов и изысканий и др.).

Под требуемой надежностью пролетного строения понимается его способность обеспечивать установленные транспортно-эксплуатационные характеристики в заданных условиях эксплуатации в течение принятого срока службы с необходимыми перерывами на техническое обслуживание и ремонты.

Установлено, что работоспособность пролетного строения в наибольшей степени зависит от прочности бетона на осевое сжатие, времени начала коррозии арматуры при воздействии углекислого газа и ионов хлоридов, времени раскрытия коррозионных трещин, количества дней в году с осадками более 2,5 мм и возникающего изгибающего момента. На основании этого обоснован концептуальный подход к прогнозированию и обеспечению требуемых показателей надежности пролетных строений железобетонных мостовых сооружений. Сущность подхода заключается в определении, контроле и уменьшении агрессивного воздействия факторов износа за счет разработки и применения методов прогнозирования показателей надежности пролетных строений железобетонных мостов для обоснования технических и технологических решений по ее повышению.

Во второй главе «Разработка методов прогнозирования показателей надежности пролетных строений железобетонных мостов» по результатам анализа выполненных исследований и нормативно-технической базы регулирования дорожной деятельности, а также экспертно-аналитических мероприятий по применению новых материалов и технологий при строительстве и реконструкции автомобильных дорог, обоснованы показатели надежности железобетонного пролетного строения автодорожного моста. Значимыми показателями надежности пролетного строения являются: вероятность безотказной работы; среднее время наработки на отказ; гамма-процентный срок службы; среднее время простоя.

Обоснование показателей надежности пролетного строения позволило разработать методы ее оценки, являющиеся основными положениями, выносимыми на защиту.

1. Метод прогнозирования безотказности пролетных строений железобетонных мостов предназначен для установления способа и выбора

технического решения по обеспечению требуемой надежности конструктивных элементов и пролетного строения в целом.

Сущность метода заключается в оценке вероятности безотказной работы и математического ожидания времени наработки на отказ пролетного строения с учетом динамики и вариативности прочностных и деформационных характеристик его взаимосвязанных конструктивных элементов, состава и интенсивности транспортного потока, природно-климатических условий и технологий содержания мостов, воздействующих агрессивных факторов, а также продолжительности межремонтных периодов и сроков проведения ремонтно-восстановительных работ.

Математическая постановка задачи по обеспечению требуемой надежности конструктивных элементов и пролетного строения состоит в следующем. Пусть существует разрезное балочное пролетное строение железобетонного моста, состоящего из m балок, которые омоноличены между собой плитами. Каждая i -ая ($i = 1 \dots m$) балка пролетного строения характеризуется предельным изгибающим моментом $M_{ult,ti}$, кНм, в момент времени t , который зависит от физико-механических характеристик конструкционных материалов и их вариативности, концентрации воздействующих на материалы углекислого газа и ионов хлорида, степени коррозии арматуры, ширины раскрытия поперечных и коррозионных трещин и геометрических параметров балки. На пролетное строение воздействует внешние подвижные и постоянные нагрузки, вызывающие изгибающий момент i -ой балки $M_{y,ti}$, кНм, в момент времени t . В результате воздействия нагрузок и агрессивных сред, параметры которых являются случайными величинами, существует вероятность наступления отказа в работе каждой из балок пролетного строения $p_{i(t)}$ и пролетного строения в целом $P_{(t)}$. Требуется определить вероятность события $P_{(t)}$, заключающегося в утрате работоспособности пролетного строения. При этом, под утратой работоспособности (отказе) понимается состояние, при котором не выполняется условие (1):

$$M_{y,ti} < M_{ult,ti}. \quad (1)$$

При решении этой задачи учитывается, что в процессе эксплуатации пролетного строения в результате воздействия агрессивных сред происходит ухудшение его прочностных характеристик $M_{ult,ti}$, в то время как, возникающие усилия (изгибающий момент $M_{y,ti}$) имеет возрастающую динамику в результате увеличения весогабаритных характеристик транспорта и интенсивности движения. В связи с этим необходимо определить количественные характеристики механизмов разрушения конструктивных элементов, при которых наступает их отказ по прочности $M_{ult,ti}$, а также установить их взаимное влияние на безотказность пролетного строения $P_{(t)}$. Математическое описание такой взаимосвязи выполняется на основании структурной функции надежности системы.

Обоснование математической постановки задачи позволили разработать укрупненную схему алгоритма реализации метода прогнозирования безотказности, которая представлена на Рисунке 1.

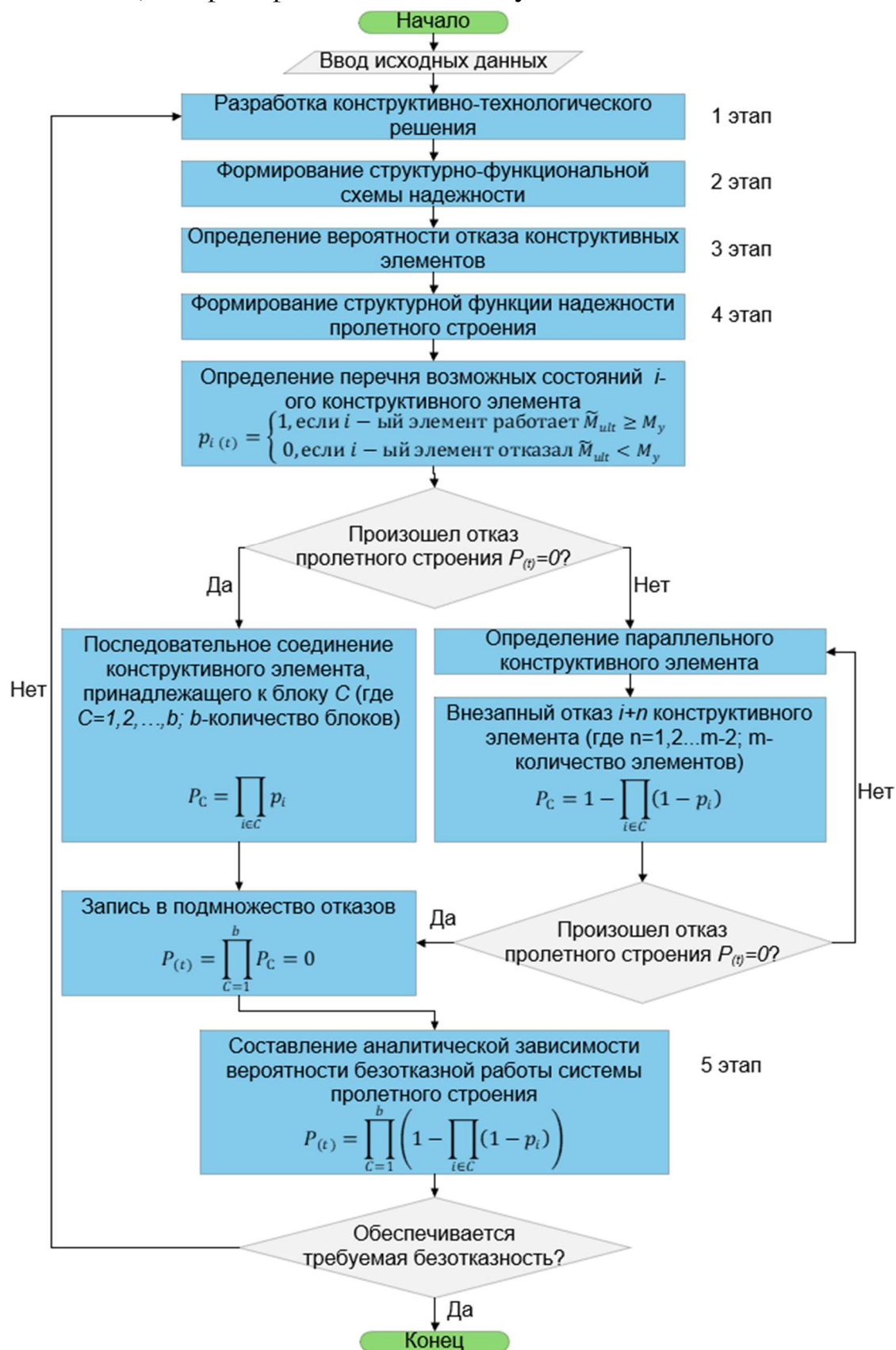


Рисунок 1 – Укрупненная схема определения структурно-функциональной схемы надежности пролетного строения

Для системы пролетного строения, имеющей сложную структуру с последовательно-параллельными элементами, отказ трех последовательных балок или отказ двух из трех крайних балок приводит к зависимым отказам (Рисунок 2), т. е. начинается процесс лавинообразного обрушения.

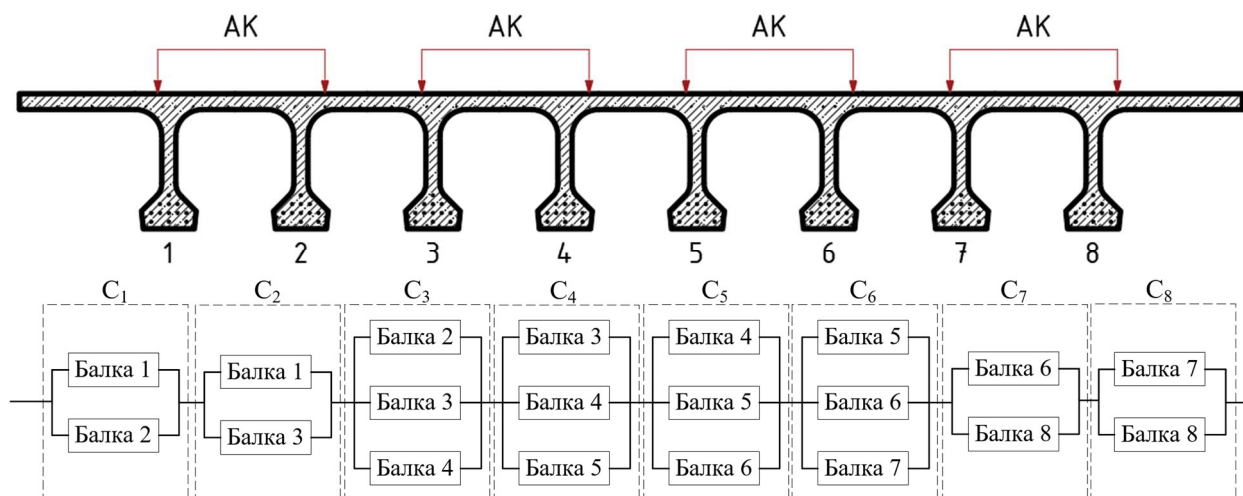


Рисунок 2 - Структурная схема надежности пролетного строения

Установлено, структурная функция надежности для прогнозирования вероятности безотказной работы всей системы пролетного строения с последовательно-параллельным соединением элементов и блоков может быть представлена в следующем виде (2):

$$P_{(t)} = \prod_{c=1}^b \left(1 - \prod_{i \in C} (1 - p_i) \right), \quad (2)$$

где p_i - вероятность безотказной работы i -ой балки пролетного строения, принадлежащей к блоку $C = 1, 2, \dots, b$; b – количество блоков, шт.

Теоретическая значимость метода состоит в том, что он является дальнейшим развитием методов и средств математического и физического моделирования работы мостовых конструкций с учетом взаимосвязей конструктивных элементов, режимов эксплуатации, оценки технических рисков, исследования возникающих аварийных ситуаций при строительстве, эксплуатации и реконструкции транспортных сооружений.

Практическая значимость метода определяется тем, что он позволяет прогнозировать сроки межремонтных периодов работы пролетных строений мостов, разрабатывать организационно-технические и конструктивные решения по повышению безопасности мостовых сооружений, а также предотвратить социально-экономические ущербы и сократить затраты от последствий аварий и катастроф, вызванных недостаточной безотказностью.

2. Метод прогнозирования долговечности пролетных строений железобетонных мостов предназначен для обоснования прогнозных оценок гамма-процентного срока службы пролетного строения с учетом применяемых технических и технологических решений при проектировании строительства,

эксплуатации и реконструкции мостовых сооружений в целях повышения их надежности (исключения преждевременных отказов).

Сущность метода заключается в установлении времени безотказной работы пролетного строения (Рисунок 3) на основе разработанных аналитических зависимостей, характеризующих взаимосвязь между изменениями прочностных и деформационных характеристик его конструктивных элементов и применяемыми конструктивно-технологическими решениями на стадиях проектирования и эксплуатации. Алгоритм его реализации состоит из следующих последовательных этапов:

1. Определение начальных (проектных) прочностных и деформационных характеристик балок ($M_{ult,ti}$, $f_{z,ti}$, $a_{crc,ti}$);
2. Прогнозирование времени начала коррозии арматуры (при проектировании и в процессе эксплуатации) в заданных условиях эксплуатации (математическое ожидание времени начала коррозии);
3. Прогнозирование скорости коррозии арматуры и снижения площади поперечного сечения в течение времени t при заданных условиях эксплуатации (математическое ожидание снижения площади армирования);
4. Расчет прочностных и деформационных характеристик (при проектировании и в процессе эксплуатации) балок в момент времени t при заданных условиях эксплуатации;
5. Прогнозирование возникающих усилий в балках (при проектировании и в процессе эксплуатации) в момент времени t ;
6. Расчет среднего времени наработки на частичный (по вертикальным перемещениям и ширине раскрытия трещин) и полный (по предельному изгибающему моменту) отказы (при проектировании и в процессе эксплуатации) балок пролетного строения;
7. Прогнозирование гамма-процентного срока службы пролетного строения (долговечности) до ограниченно-работоспособного и неработоспособного состояния на основании структурно-функциональной схемы надежности.

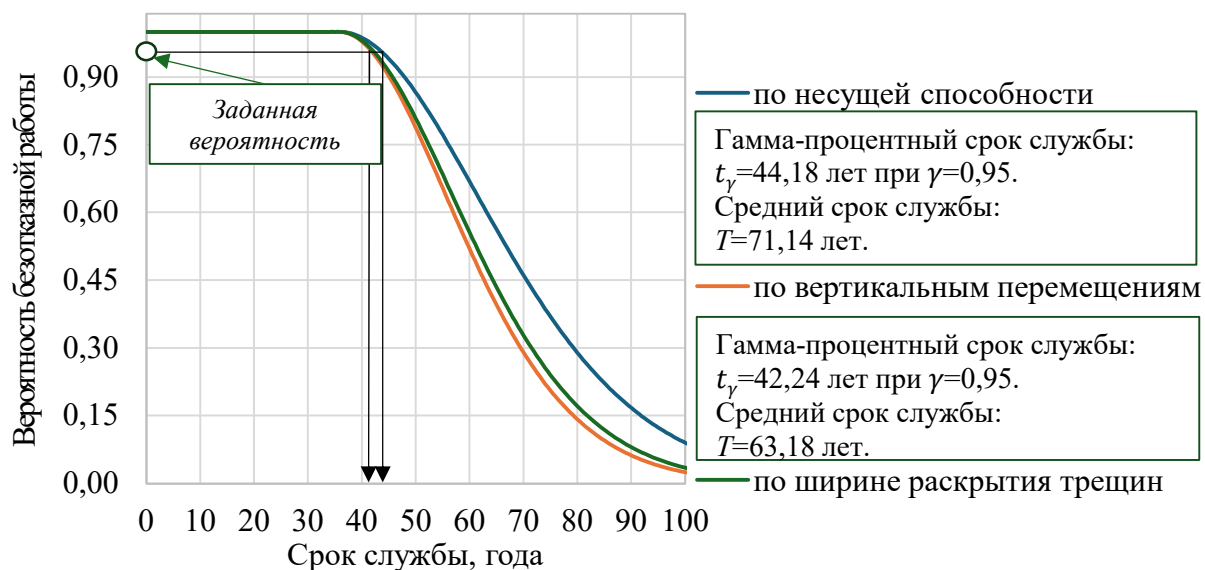


Рисунок 3 – Вероятность безотказной работы пролетного строения

Прогнозирование скорости коррозии арматуры и снижения площади поперечного сечения в течение времени t выполняется на основании времени начала коррозии при воздействии углекислого газа, ионов хлорида и времени образования трещин шириной раскрытия от 0,3 мм. Выявление времени начала коррозии выполняется на основании первого и второго закона Фика. При совместном влиянии углекислого газа и ионов хлорида время начала коррозии определяется по зависимости (3):

$$T_{carb} = t_{cor,carb}; \quad T_{Cl} = \min(t_{cor,Cl,1}; t_{cor,Cl,2}), \quad (3)$$

где T_{carb} – время начала коррозии арматуры при воздействии углекислого газа, лет; $t_{cor,carb}$ – время достижения фронтом диффузии арматуры при воздействии углекислого газа, лет; T_{Cl} – время начала коррозии арматуры при воздействии ионов хлорида, лет; $t_{cor,Cl,1}$ – время достижения фронтом диффузии арматуры при воздействии ионов хлорида, лет; $t_{cor,Cl,2}$ – время достижения фронтом диффузии арматуры при одновременном воздействии ионов хлорида и углекислого газа, лет, определяемая из условия (4):

$$t_{cor,Cl,2} = \begin{cases} t_{cor,Cl,carb}, & \text{если } t_{cor,carb} < t_{cor,Cl,carb} \\ t_{cor,carb}, & \text{если } t_{cor,carb} \geq t_{cor,Cl,carb} \end{cases}, \quad (4)$$

где $t_{cor,Cl,carb}$ – время достижения фронтом диффузии арматуры при воздействии ионов хлорида с учетом разрушения депассивирующей пленки углекислым газом, лет.

Кроме этого, образование коррозионных трещин способствует диффузии атмосферных газов в глубь бетона. При раскрытии трещины шириной 0,3 мм происходит увеличение скорости коррозии арматуры, а также процесс проникновения агрессивных сред от арматуры, от которой образовалась коррозионная трещина (Рисунок 4). Время образования трещины T_{crc} шириной раскрытия 0,3 мм зависит от времени начала коррозии вследствие ионов хлорида T_{Cl} , времени на ее раскрытие и определяется по формуле (5):

$$T_{crc} = T_{Cl} + t_{cr}, \quad (5)$$

где t_{cr} – время образования трещины с установленной шириной раскрытия, лет.

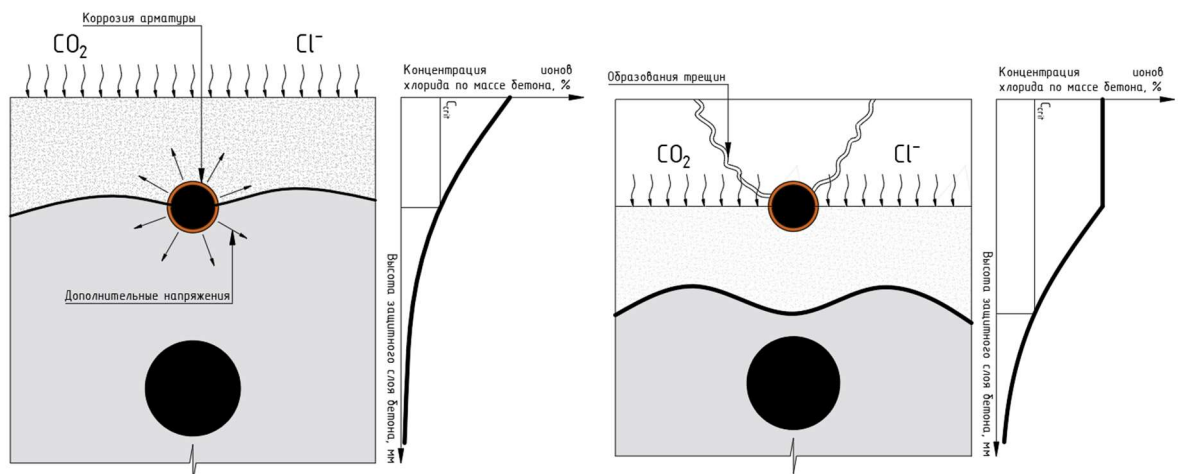


Рисунок 4 – Динамика диффузии атмосферных газов после образования коррозионных трещин

В процессе эксплуатации работоспособным состоянием конструктивного элемента является состояние, при котором отказы не происходят, то есть выполняются одновременно условия (6):

$$\begin{cases} M_{y,ti} < M_{ult,ti} \\ f_{z,ti} < f_{ult,i} \\ a_{crc,ti} < a_{crc,ult,i} \end{cases}, \quad (6)$$

где $f_{z,ti}$ – вертикальные перемещения i -ого конструктивного элемента пролетного строения, мм; $f_{ul,i}$ – нормативная величина предельных вертикальных перемещений i -ого конструктивного элемента пролетного строения, мм; $a_{crc,ti}$ – ширины раскрытия трещин, мм; $a_{crc,ult,i}$ – нормативная предельная величина ширины раскрытия трещины i -ого конструктивного элемента пролетного строения, мм.

В случае, когда наступает отказ по ширине раскрытия трещин и/или по прогибу, а несущая способность обеспечена, конструктивный элемент переходит в ограниченно-работоспособное состояние, называемым частичным отказом. Тогда срок службы до ограниченно-работоспособного состояния определяется по формуле (7):

$$T_{\text{ч}} = f(f_{z,ti}; a_{crc,ti}) \text{ при } f_{z,ti} \geq f_{ult,i} \text{ или } a_{crc,ti} \geq a_{crc,ult,i}. \quad (7)$$

Если происходит отказ по несущей способности, то конструктивный элемент переходит в неработоспособное состояние, то есть наступает его полный отказ. Тогда срок службы до неработоспособного состояния определяется по формуле (8):

$$T_{\text{п}} = f(M_{y,ti}) \text{ при } M_{y,ti} \geq M_{ult,ti}. \quad (8)$$

На рисунках 5-7 представлены динамика прочности, вертикальных перемещений и ширины раскрытия трещин балок пролетного строения, которые получены на основе разработанных аналитических зависимостей.

Аналитически гамма-процентный срок службы T_{γ} пролетного строения рассчитывается с использованием зависимости (9):

$$T_{\gamma} = T - H_{k(\gamma)} \cdot \sigma, \quad (9)$$

где $H_{k(\gamma)}$ – квантиль нормального распределения, определяемый по табличным данным; σ – стандартное отклонение срока службы, лет, определяемое на основании вероятности безотказной работы пролетного строения.

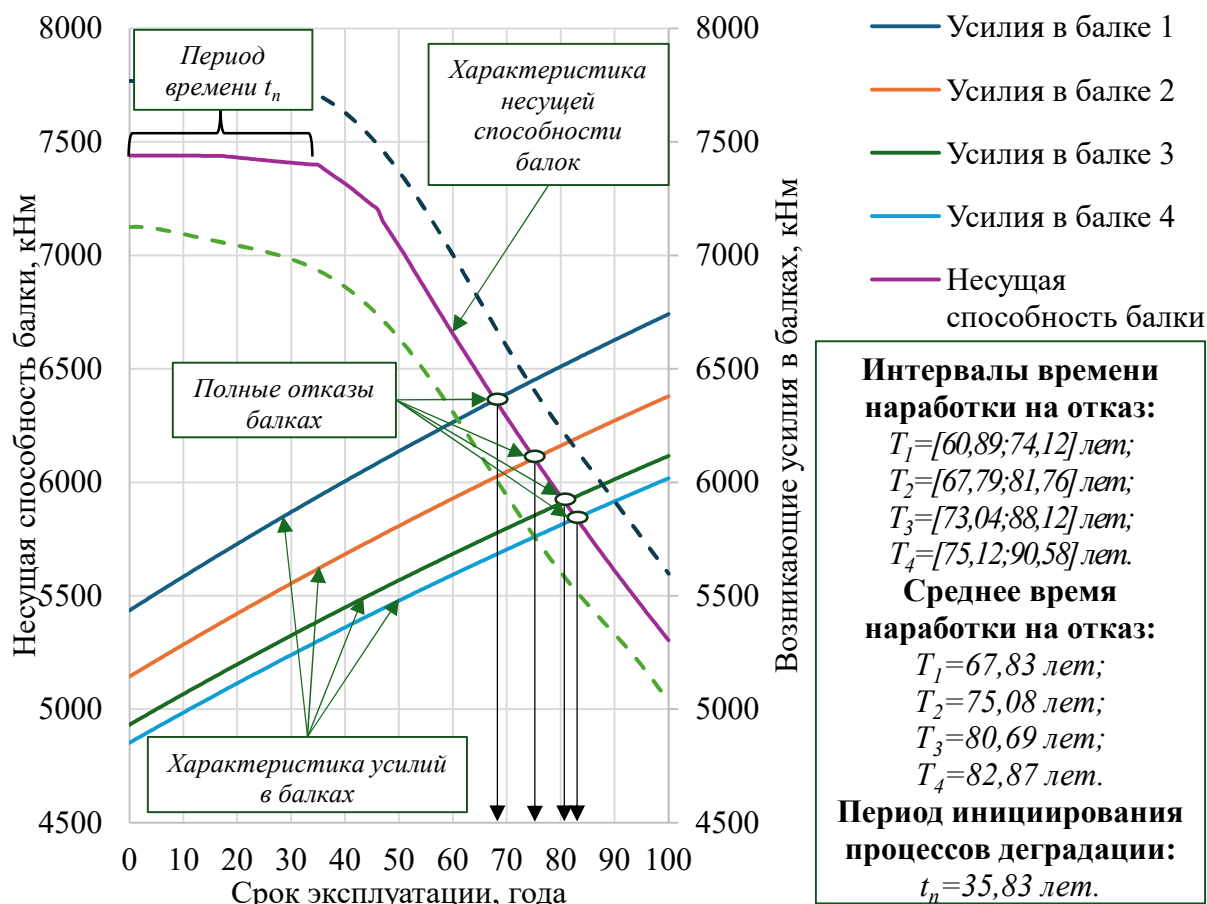


Рисунок 5 – Динамика прочности балок пролетного строения

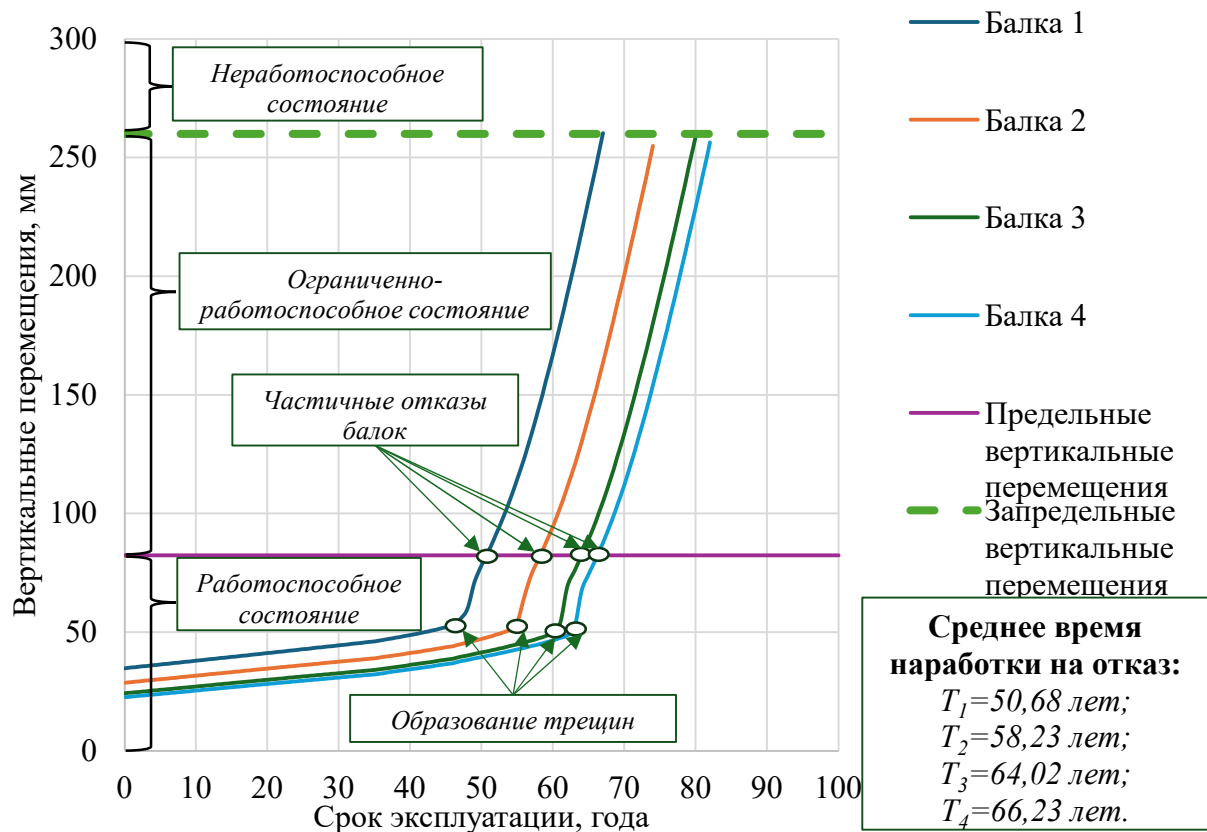


Рисунок 6 – Динамика вертикальных перемещений балок пролетного строения

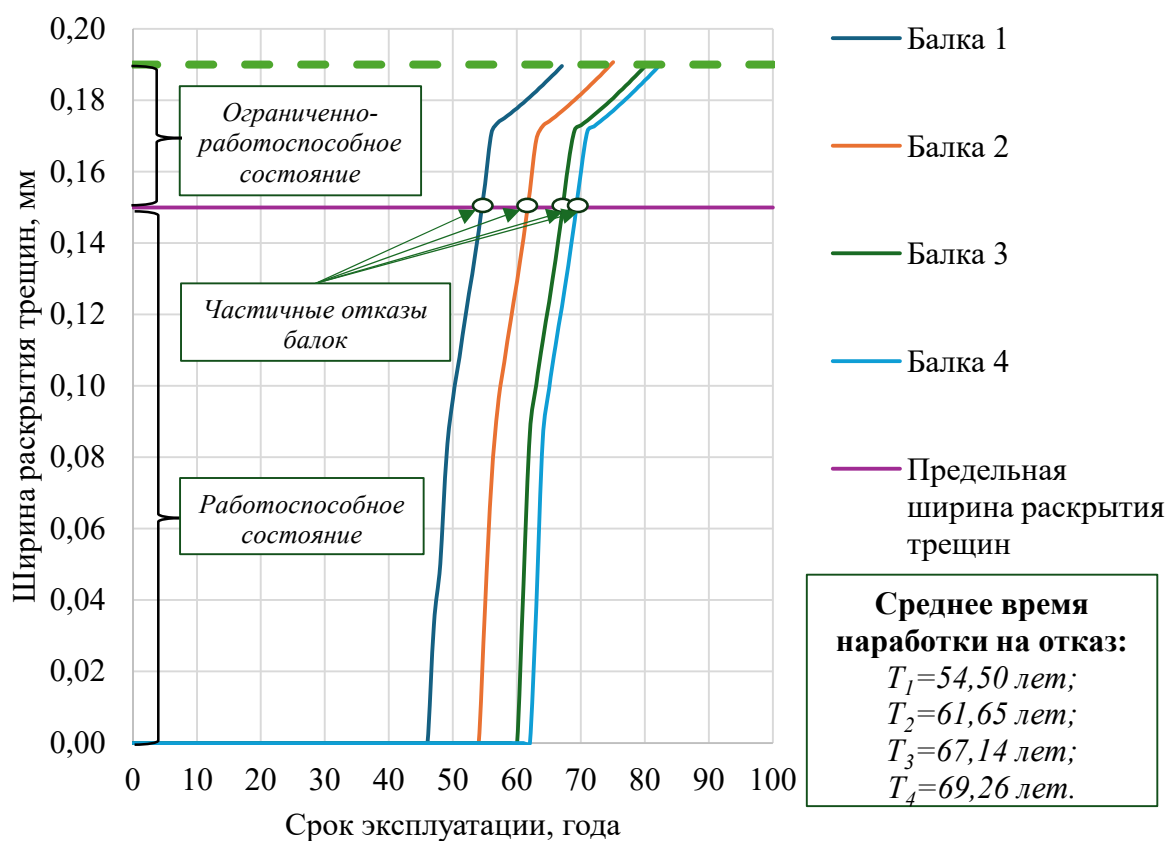


Рисунок 7 – Динамика ширины раскрытия трещин балок пролетного строения

Теоретическая значимость метода состоит в том, что он является развитием существующих положений оценки и прогнозирования напряженно-деформированного состояния пролетных строений и их долговечности с учетом взаимосвязи между конструктивно-технологическими решениями и природной средой, статического и динамического воздействия нагрузок, технологий, содержания, ремонта и реконструкции мостовых сооружений.

Практическая значимость метода заключается в том, что он позволяет прогнозировать показатели долговечности пролетных строений на стадиях проектирования и эксплуатации; оценить и обеспечить достижение требуемых показателей долговечности конструктивно-технологических решений; прогнозировать межремонтные сроки службы; сократить затраты на содержание и обосновать технико-технологические решения по профилактике и предотвращению аварий мостовых сооружений.

3. Имитационная модель работы пролетных строений железобетонных мостов (Рисунок 8) предназначена для исследования показателей их безотказности и долговечности в заданных условиях эксплуатации с учетом динамики интенсивности и состава транспортного потока, стохастического воздействия агрессивных сред, принятых конструктивно-технологических решений и выполнения мероприятий по содержанию мостовых сооружений.

Сущность имитационной модели заключается в том, что она позволяет проводить вычислительные эксперименты по имитации параметров нагрузок, принятых конструктивно-технологических решений, содержания углекислого

газа и ионов хлорида в агрессивных средах, а также технико-экономических характеристик мероприятий по содержанию, ремонту и реконструкции мостовых сооружений в целях оценки и прогнозирования безотказности и долговечности пролетных строений. Имитационная модель основывается на аналитических зависимостях расчета показателей надежности и разработанной процессно-событийной процедуре имитации нагрузок и факторов агрессивной среды, воздействующих на балку пролетного строения.

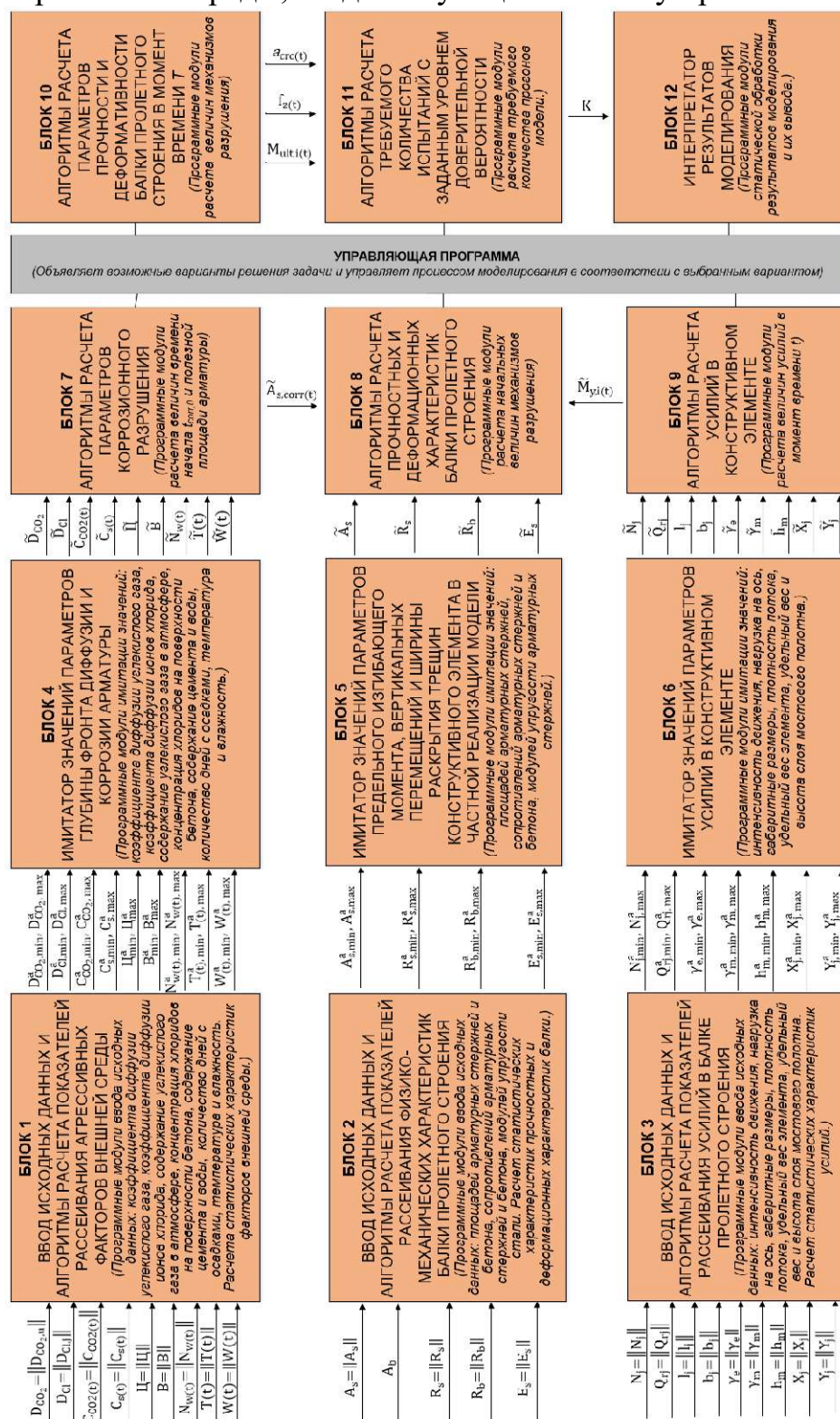


Рисунок 8 - Структура имитационной модели работы балки пролетного строения

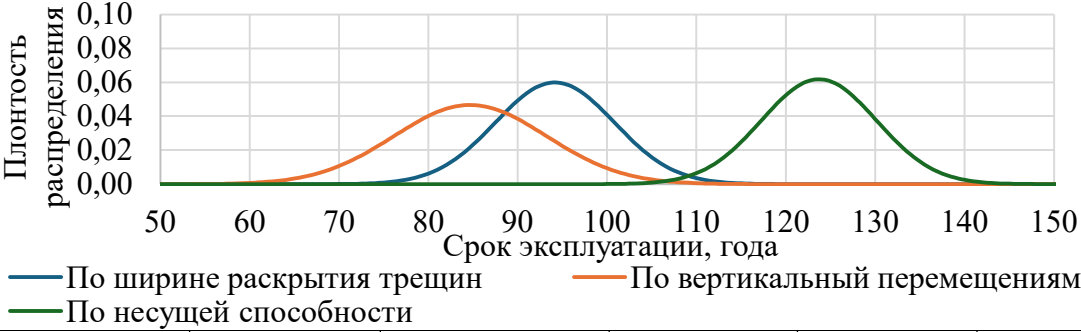
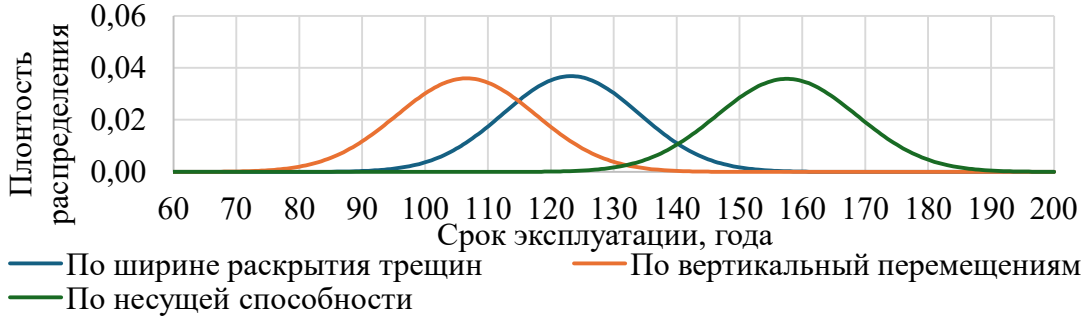
Структура входной информации и условные обозначения рассматриваемых факторов приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Воздействующие факторы на срок службы пролетного строения

№ п/п	Наименование, ед. изм.	Буквенное обозначение	Закон распределения
1	Начальный коэффициент диффузии ионов хлорида, м ² /с	$\tilde{D}_{ClO}$	Нормальный
2	Содержание углекислого газа в атмосфере, кг/м ³	$\tilde{C}_{CO_2(t)}$	Экспоненциальный
3	Площадь поперечного сечения арматуры, мм ²	$\tilde{A}_s$	Нормальный
4	Предел прочности бетона на одноосное сжатие, МПа	$\tilde{R}_b$	Нормальный
5	Сосредоточенная нагрузка на r -ое, определяемая как половина нагрузки от d -ой оси j -ого расчетного автомобиля, кН	$\tilde{Q}_{rj}$	Экспоненциальный
6	Удельный вес балки, кН/м ³	$\tilde{\gamma}_e$	Нормальный

В результате имитационного моделирования получены функции плотности распределения времени безотказной работы (Таблицу 2).

Таблица 2 – Статистические характеристики времени наработки на отказ пролетного строения

№ п/п	Механизм разрушения:					
	по ширине раскрытия трещин		по вертикальным перемещениям		по несущей способности	
	$\tilde{M}_T$	σ_T	$\tilde{M}_T$	σ_T	$\tilde{M}_T$	σ_T
1	При нанесение композитного покрытия на арматуру					
						
	94,15	6,66	84,67	8,55	123,70	6,45
2	При применении арматуры, выполненной из коррозионностойкой стали					
						
	123,20	10,83	106,57	11,09	157,51	11,15

Теоретическая значимость имитационной модели состоит в том, что она является дальнейшим развитием теоретических и экспериментальных методов проектирования транспортных сооружений, их элементов и объектов транспортной инфраструктуры, методов профилактики и предотвращения возможных аварий с учетом взаимосвязей между всеми компонентами природно-технических систем.

Практическая значимость имитационной модели заключается в возможности ее применения для прогнозирования межремонтных сроков службы, показателей надежности пролетных строений железобетонных мостов, а также разработки практических мероприятий по повышению безотказности и долговечности, что способствует снижению затрат не только на эксплуатацию мостового сооружения, но и ликвидацию последствий преждевременных разрушений.

В третьей главе «Экспериментальная проверка результатов исследования и практические рекомендации по обеспечению требуемых показателей надежности пролетных строений железобетонных мостов» выполнена экспериментальная проверка результатов исследования и разработаны практические рекомендации по обеспечению требуемых показателей надежности пролетных строений железобетонных мостов. Установлено, что время наработки до ограниченного-работоспособного и неработоспособного состояний определяется прочностью бетона на осевое сжатие, временем начала коррозии арматуры при воздействии углекислого газа и ионов хлоридов, времени раскрытия коррозионных трещин, количеством дней в году с осадками более 2,5 мм и возникающим изгибающим моментом. По результатам эксперимента получено уравнение регрессионной математической модели времени безотказной работы пролетного строения железобетонного моста (10):

$$T_{\text{сл}} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{iu} x_i x_u + \dots + \sum_{i=1}^k b_{iue} x_i x_u x_e, \quad (10)$$

где x_i – величина воздействующего фактора; b_i – коэффициент регрессии, определенный на основании имитационного моделирования (Таблицу 3).

Таблица 3 – Коэффициенты регрессии времени безотказной работы (функции отклика).

№ п/п	Обозначение коэффициента регрессии	Время безотказной работы до:	
		Ограниченно- неработоспособного состояния	Неработоспособного состояния
1	b_0	57,72	75,03
2	b_1	1,99	0,81
3	b_2	-	0,42
4	b_3	3,41	6,39
5	b_4	0,37	0,97
6	b_5	-1,28	-2,81
7	b_6	-15,71	-11,34
8	b_{13}	0,47	-
9	b_{14}	-	0,20
10	b_{15}	-0,44	-

Продолжение таблицы 3

11	b_{16}	0,97	-
12	b_{24}	-	0,19
13	b_{34}	-	0,33
14	b_{35}	0,40	0,43
15	b_{36}	-2,16	0,52
16	b_{46}	-0,58	-0,19
17	b_{56}	1,16	1,18
18	b_{125}	-	-0,26
19	b_{134}	0,48	-
20	b_{135}	-0,32	-
21	b_{136}	0,43	-
22	b_{146}	0,49	-
23	b_{235}	-	-0,23
24	b_{245}	-0,40	-0,18
25	b_{346}	-	0,20
26	b_{1236}	-	-0,20
27	b_{1345}	-0,39	-
28	b_{12345}	-	0,26
29	b_{13456}	-	0,20
30	b_{12456}	-	-0,28
Примечание. В таблице знаком «-» отмечены коэффициенты регрессии, которые не влияют на время безотказной работы пролетного строения.			

Проверка его адекватности по F-критерию и верификация имитационной модели по критерию Манна-Уитни подтвердили допустимость выдвинутых законов распределения влияющих на надежность факторов. Применение уравнения (9) значительно снижает трудоемкость расчетов и позволяет проектным и эксплуатирующим дорожно-строительным организациям провести оценку надежности принятых конструктивно-технологических решений на стадиях проектирования и строительства, а также оценить остаточный срок службы существующих мостов.

На основе результатов имитационного моделирования предложены рациональные технические и технологические решения, обеспечивающие требуемые показатели надежности пролетного строения, расположенного в Северо-Западном регионе Российской Федерации. Основными вариантами технических решений для предотвращения коррозии приняты:

1. Стандартная эксплуатация (без применения защитных мероприятий);
2. Окрашивание открытых бетонных поверхностей перед началом эксплуатации и на 25-м году эксплуатации;
3. Замена защитного слоя толщиной 40 мм на 25-м и 50-м годах эксплуатации;
4. Комбинированный способ предотвращения раннего срока начала коррозии: окрашивание открытых бетонных поверхностей в начале

эксплуатации, замена защитного слоя толщиной 40 мм на 64-м году эксплуатации с последующей окраской открытой поверхности;

5. Нанесение композитного покрытия на арматуру;
6. Защита арматуры от электрохимической коррозии;
7. Применение напрягаемой арматуры, выполненной из коррозионностойкой стали.

Для исключения преждевременных отказов от возрастающих нагрузок необходимо применить технические и технологические решения, связанные с повышением прочностных и деформационных характеристик. Таковыми являются:

1. Усиление металлическими уголками;
2. Усиление полимерными холстами;
3. Усиление внешним армированием напрягаемыми канатами;
4. Устройство дублирующих элементов.

При проведении анализа рассмотрено 35 вариантов решений по предотвращению ранней коррозии, усилению и изменению конструктивной схемы. Выбор лучшего варианта осуществлен по параметрам: гамма-процентный срок службы, вероятность безотказной работы, время простоя, коэффициент готовности и суммарная стоимость работ. Рассчитана мера близости этих вариантов к наилучшему решению в области исследуемого 9-мерного таксономического пространства. Выполнено их ранжирование по степени реализуемости и обеспечению требуемых показателей надежности. Построена диаграмма результатов таксономического анализа технических и технологических решений (Рисунок 9) обеспечения показателей надежности пролетного строения для мостовых сооружений Северо-Западного региона Российской Федерации.

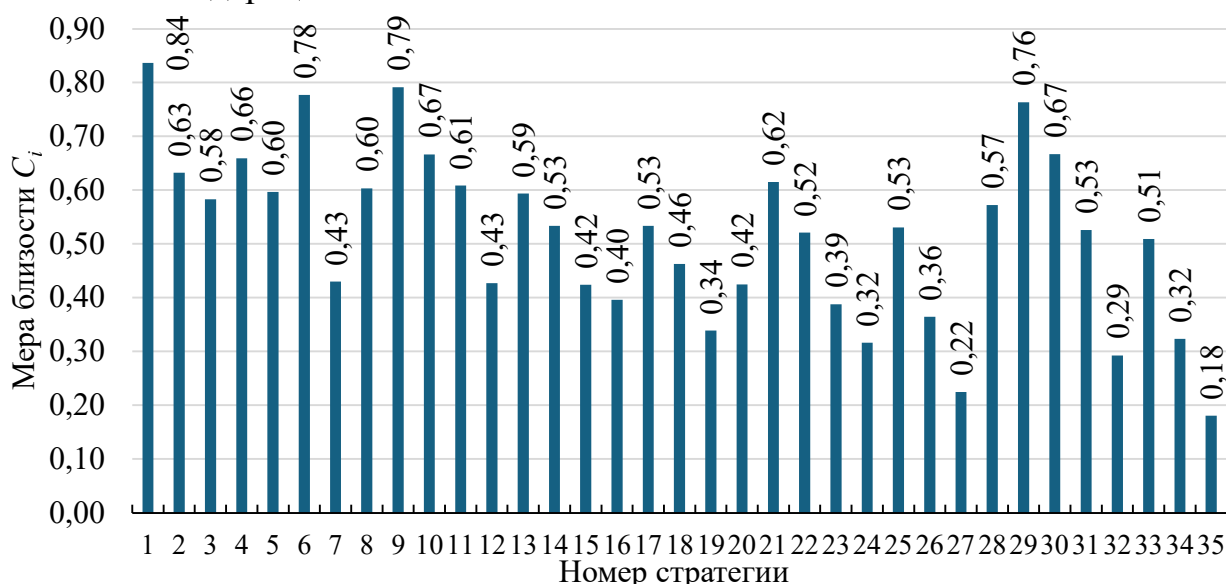


Рисунок 9 – Результаты таксономического анализа технических и технологических решений обеспечения показателей надежности пролетного строения

Анализ полученной диаграммы позволил сделать вывод о том, что рациональным вариантом является применение коррозионностойкой

высокопрочной напрягаемой арматуры с последующим устройством дублирующих балок. Его основные технико-экономические характеристики представлены в Таблице 4.

Таблица 4 – Основные технико-экономические характеристики рационального варианта технического и технологического решения.

№ п/п	Характеристика	Значение
1	Наименование технического решения периода превентивных мер	Применение напрягаемой арматуры, выполненной из коррозионностойкой стали
2	Время начала периода преждевременных отказов, лет	88,32
3	Стоимость выполнения работ с учетом дисконтирования для периода превентивных мер, руб	9 320 897,60
4	Механизм разрушения по окончанию периода превентивных мер	по вертикальным перемещениям
5	Наименование технического решения периода преждевременных отказов (по усилению)	Устройство дублирующих элементов
6	Время наступление отказов, лет	142,95
7	Механизм разрушения	по вертикальным перемещениям
8	Стоимость выполнения работ с учетом дисконтирования, руб	45,59
9	Суммарная стоимость выполнения работ, руб.	9320943,19

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научная задача, которая заключается в разработке методов прогнозирования показателей надежности пролетных строений железобетонных мостов на основе математического и имитационного моделирования динамики прочности и деформативности их конструктивных элементов с учетом стохастичности условий эксплуатации и факторов износа. Решение научной задачи и достижение цели диссертации подтверждается следующими научно обоснованными выводами и рекомендациями:

1. Недостаточная надежность и безопасность мостовых сооружений являются причинами аварий и разрушений мостов с катастрофическими последствиями. Существующие модели и методы прогнозирования показателей надежности пролетного строения не учитывают стохастический нестационарный характер физического износа, вызванного воздействием агрессивных сред, увеличением интенсивности транспортного потока и параметров расчетных нагрузок, а также взаимодействием конструктивных элементов пролетного строения.

2. Разработан метод прогнозирования безотказности пролетного строения, **научная новизна** которого заключается в том, что он, по сравнению с имеющимися, *учитывает* стохастический характер состава и интенсивности

движения, технологических процессов строительства и содержания мостовых сооружений, физико-механических характеристик применяемых материалов, агрессивность природно-климатических факторов; *отличается* от существующих применением математического аппарата структурных функций надежности сложных технических систем, повышающим точность и достоверность оценки безотказности; *позволяет* прогнозировать сроки межремонтной службы мостов с учетом показателей качества материалов и технологий строительства и содержания, разрабатывать организационно-технические и конструктивные решения по повышению безопасности мостовых сооружений.

3. Разработан метод прогнозирования долговечности пролетных строений железобетонных мостов **научная новизна** которого состоит в том, что он, в отличие от существующих, *учитывает* совместное воздействие агрессивных внешних сред, динамики нагрузок от транспортного потока, применяемых конструкционных материалов и технико-технологических решений в процессе эксплуатации на показатели долговечности пролетного строения; *отличается* от имеющихся комплексным применением методов теории упругости и прочности, аналитических зависимостей, описывающих диффузию атмосферных газов и коррозионное разрушение арматуры, а также модели прогнозирования усилий в конструктивных элементах пролетного строения, вызванных транспортным потоком; *позволяет* прогнозировать гамма-процентные сроки службы пролетного строения до ограниченно-работоспособного и неработоспособного состояний, обосновывать и разрабатывать конструктивно-технологические решения и требуемые ремонтно-восстановительные мероприятия в процессе эксплуатации.

4. Построена имитационная модель работы пролетных строений железобетонных мостов, **научная новизна** которой определяется тем, что она по сравнению с имеющимися *учитывает* стохастический характер интенсивности и состава транспортного потока, снижение прочностных и деформационных характеристик балок пролетного строения в результате фреттинг-коррозии, вариабельности физико-механических характеристик конструкционных материалов при строительстве и содержании мостов при эксплуатации; *отличается* применением процедур имитации динамики транспортных потоков, нагрузок, процессов разрушения конструкционных материалов от воздействия агрессивных сред; *позволяет* на основе проведения достаточного числа испытаний, установить с заданной точностью безотказность работы пролетных строений, оценить эффективность мероприятий по повышению показателей их надежности и снижения рисков преждевременного разрушения при совместном влиянии на безотказность и долговечность транспортных потоков и агрессивных сред.

5. Выполнена экспериментальная проверка, апробация и реализация методов прогнозирования показателей надежности пролетных строений железобетонных мостов. Выявлены функции плотности распределения времени их безотказной работы, установлены закономерности влияния на

безотказность и долговечность нагрузок, агрессивных сред, получена регрессионная модель прочности и деформативности конструктивных элементов. Установлена их адекватность фактической динамике изменения прочности и деформативности балок пролетного строения в процессе эксплуатации мостов в условиях воздействия нагрузок и агрессивных сред.

6. Разработано техническое решение, позволяющее увеличить межремонтный срок службы пролетных строений за счет применения напрягаемой арматуры, выполненной из коррозионностойкой стали, при строительстве пролетного строения. В течение требуемого срока службы обеспечение надежности и безопасности пролетного строения достигается применением дублирующих элементов балок пролетного строения.

Наиболее перспективным направлением разработки исследуемой темы является развитие теории и практики применения риск-ориентированного подхода при проектировании, строительстве и эксплуатации мостовых сооружений на основе научного обоснования концепции управления техническими и технологическими рисками, моделей и методов исследования риска, разработки технических решений по предотвращению преждевременных разрушений, аварий и катастроф транспортных сооружений.

СПИСОК РАБОТ, В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

1. Огурцов Г.Л., Ермошин Н.А. Метод определения долговечности пролётного строения моста. Мир транспорта. 2024;22(4):33-42. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-5>. (БАК K1)
2. Огурцов Г.Л., Ермошин Н.А. Метод определения безотказности пролетного строения моста на основе структурно-функционального подхода // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 203-216. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1203-216. EDN: WRUPVL. (БАК K2)
3. Огурцов Г. Л., Ермошин Н. А., Бирюков О. Р. Применение имитационного моделирования для оценки долговечности балок пролетного строения железобетонных мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 104-113. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_104. (БАК K2)
4. Огурцов Г.Л., Ермошин Н.А. Метод прогнозирования усилий в железобетонных пролётных строениях мостовых сооружений при их проектировании и эксплуатации // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 169-182. DOI 10.24866/2227-6858/2025-2/169-182. (БАК K2)
5. Огурцов Г.Л., Ермошин Н.А., Исмаилов А.М. Применение таксономического анализа при оценке стратегии эксплуатации пролетного строения // Инновационные транспортные системы и технологии. - 2025. - Т. 11. - №3. - С. 396-408. doi: 10.17816/transsyst684014. (БАК K2)