

На правах рукописи



Козак Николай Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ПРОВЕРКИ
ВЫНОСЛИВОСТИ ГИБКИХ ШТЫРЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ОБЪЕДИНЕНИЯ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ
СТРОЕНИЙ АВТОДОРОЖНЫХ МОСТОВ С УЧЕТОМ
ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: **Быстров Владимир Аполлинарьевич**
кандидат технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры автомобильных дорог, мостов и тоннелей ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственных архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург.

Официальные оппоненты: **Овчинников Игорь Георгиевич**
заслуженный деятель науки РФ, действительный член Российской академии транспорта, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортное строительство» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.», г. Саратов.

Козлов Алексей Владимирович
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры проектирования автомобильных дорог и мостов ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», заместитель генерального директора по научной работе ООО «Научно-исследовательский центр транспортной инфраструктуры», г. Воронеж.

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

Защита состоится «22» июня 2023 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета У.2.1.8.04 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 .05.2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.2.1.8.04,
к.т.н., доцент



Радасв А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из важнейших отличительных особенностей условий работы мостовых конструкций является нестационарный динамический характер их режима нагружения. В подобных режимах эксплуатации, включающих большое количество циклов изменения усилий и напряжений в элементах, значительная роль отводится определению выносливости элементов конструкций. Применительно к конструкциям сталежелезобетонных пролетных строений, получивших значительное распространение в настоящее время, одним из менее исследованных является вопрос выносливости элементов объединения стальных балок и железобетонной плиты. Как показывает многолетний опыт обследования эксплуатируемых мостовых сооружений, после 10-15 лет эксплуатации в конструкциях сталежелезобетонных пролетных строений (СТЖБ ПС) появляются дефекты и повреждения (провисания, трещины в железобетонной плите и др.), свидетельствующие о снижении жесткости конструкций и транспортно-эксплуатационных характеристик эксплуатируемого объекта. Одной из главных причин снижения жесткости является необеспеченность надежности работы элементов объединения (ЭО) конструкций сталежелезобетонных пролетных строений при воздействии временных подвижных нагрузок вследствие усталостных разрушений. В современных отечественных нормах при проектировании автодорожных и городских мостов расчет гибких штыревых элементов объединения на выносливость не производится. В то же время с учетом того, что элементы объединения даже при расчете конструкций в квазистатической постановке характеризуются наличием значительных циклических воздействий, нормативный отказ от проектной проверки выносливости элементов объединения автодорожных и городских мостов теоретически и экспериментально не обоснован.

Степень разработанности темы исследования.

В настоящее время проверка выносливости гибких штыревых упоров по отечественным нормам СП 35.13330.2011 не регламентируется, как и в целом проверка выносливости элементов объединения автодорожных мостов. В зарубежных нормах проектирования и расчета сталежелезобетонных конструкций (Еврокод, AASHTO LRFD) подобные требования имеются и предложены соответствующие методики проверки выносливости. Используемые в отечественных и зарубежных нормах общие методики проверки выносливости значительно отличаются друг от друга. Ряд важных аспектов обеспечения работы конструкций элементов объединения сталежелезобетонных пролетных строений нашли отражение в научно-исследовательских работах, на которые даны ссылки в I главе диссертации. Это работы ученых и специалистов: Е.Е. Гибшмана, Н.Н. Стрелецкого, Н.И. Новожиловой, В.А. Быстрова, И.Ю. Белуцкого, И.Г. Овчинникова, А.И. Васильева, М.М. Корнеева, Ф.С. Замалиева, А.В. Козлова, Г.Н. Ростовых, Р.Г. Слюттера, Дж. В. Фишера, А.С. Новака, М.М. Педерсена,

Р.П. Джонсона, Ф.М. Руссо, И. Вайаса, Ф.Н. Лейтао, Б. Ванга и др. Однако вопросы проверки выносливости элементов объединения сталежелезобетонных пролетных строений остаются малоизученными. В целях совершенствования метода проверки выносливости конструкций элементов объединения в виде гибких штыревых упоров от воздействия нестационарного потока автомобильного транспорта с учетом фактической динамической нагруженности требуется проведение экспериментально-теоретических исследований на реальных объектах.

Объект исследования – сталежелезобетонные пролетные строения автомобильных мостов с элементами объединения железобетонной плиты с металлическими балками в виде гибких штыревых упоров.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние (НДС) и выносливость гибких штыревых упоров элементов объединения балок и плит сталежелезобетонных пролетных строений при воздействии фактических динамических нагрузок автомобильных мостов.

Цель диссертационной работы заключается в экспериментально-теоретическом совершенствовании метода проверки выносливости гибких элементов конструкций объединения сталежелезобетонных пролетных строений (гибких штыревых упоров) автомобильных мостов на основе учета особенностей воздействия на элементы конструкций сталежелезобетонных пролетных строений фактических динамических нагрузок.

Для достижения цели решены следующие задачи:

– проведен анализ применяемых в настоящее время в отечественной и зарубежной практике проектирования способов объединения элементов сталежелезобетонных пролетных строений;

– проведено исследование существующих методов проверки выносливости и анализ факторов, влияющих на результаты проверки выносливости элементов объединения;

– выполнен комплексный сравнительный анализ (качественный и количественный) применяемых методик проверки выносливости элементов объединения на примере эксплуатируемых автомобильных мостов с учетом параметров нагруженности;

– разработано теоретическое обоснование модифицированного метода проверки выносливости на основе набора параметров (факторов), учитываемых в формуле проверки;

– разработана программа и проведен натурный эксперимент на эксплуатируемом автомобильном мосту (в два этапа – краткосрочный и долгосрочный) для определения фактических параметров динамической нагруженности элементов объединения сталежелезобетонных пролетных строений;

– выполнено конечно-элементное моделирование работы элементов объединения пролетных строений и определены зависимости между сдвигающими усилиями и напряжениями от воздействия подвижных нагрузок;

– проверена адекватность существующей инженерной методики моделирования работы элементов объединения в виде гибких штыревых упоров с использованием полученных экспериментальных данных;

– проведено количественное и качественное определение параметров усовершенствованного метода проверки выносливости элементов объединения на основе полученных экспериментальных данных нагруженности пролетного строения моста;

– обоснована расчетная подвижная нагрузка для выполнения проверки выносливости элементов объединения в виде гибких штыревых упоров сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов.

Научная новизна работы:

1. Разработаны новые аналитические зависимости для определения коэффициентов усталостных и прочностных свойств элемента конструкции, что позволяет расширить область применения существующего метода проверки выносливости на элементы объединения сталежелезобетонных пролетных строений в виде гибких штыревых упоров;

2. Установлено наличие значительных динамических эффектов для сдвигающих сил, воздействующих на гибкие штыревые упоры в зонах вблизи деформационных швов, а также количественно определены величины фактических динамических коэффициентов к сдвигающим усилиям на элементы объединения;

3. Введен коэффициент, отражающий количество циклов изменения напряжений в гибких штыревых упорах за 1 проход транспортной нагрузки;

4. Разработана вероятностно-весовая модель нагрузки от транспортного потока, использование которой позволяет в динамике определять величину накопленного повреждения элемента объединения на основе фактических данных об интенсивности и составе движения.

Теоретическая значимость заключается в расширении области применения существующего метода проверки выносливости металлических элементов конструкций на элементы объединения сталежелезобетонных пролетных строений в виде гибких штыревых упоров.

Практическая значимость заключается в разработке способа повышения эксплуатационной надежности и долговечности конструкций сталежелезобетонных пролетных строений мостов за счет уточнения расчета элементов объединения путем проведения проверки их выносливости; в разработке инженерного алгоритма проведения проверки выносливости элементов объединения, позволяющего проводить расчет на основании фактических данных об интенсивности и составе движения; в разработке программы обработки и анализа экспериментальных данных «ГензоАнализ», позволяющей автоматизированно получать информацию о накоплении повреждений в контролируемых элементах (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022613739).

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основами диссертационного исследования послужили

современные положения теорий усталости и выносливости металлов и теории расчетов сталежелезобетонных конструкций мостов. Для разработки усовершенствованного метода проверки выносливости проведен анализ теоретических основ ряда существующих методов проверки выносливости, результаты которого в сочетании с основами теории усталости металлов легли в основу синтеза нового метода проверки. Для уточнения параметров метода проверки подготовлены и проведены по разработанной программе натурные эксперименты. При обработке экспериментальных данных использованы методы статистической обработки данных (классический «метод дождя»). Теоретическое напряженно-деформированное состояние объекта исследования моделировалось численно с использованием метода конечных элементов, реализованного в лицензионных программных комплексах SOFiStiK и ANSYS. При моделировании процессов накопления усталостных повреждений использована классическая теория линейного суммирования усталостных повреждений (гипотеза Пальмгрена-Майнера).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Усовершенствованный метод, позволяющий производить проверку выносливости элементов объединения (гибких упоров) конструкций сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов;

2. Полученный экспериментально коэффициент расчетных циклов напряжений от расчетных нагрузок N_L ;

3. Полученные экспериментально величины динамических коэффициентов для усилий, возникающих в элементах объединения в зонах вблизи деформационных швов.

4. Методика назначения повышенного динамического коэффициента $(1+\mu)_T$ для сдвигающих усилий, возникающих в элементах объединения в зонах вблизи деформационных швов;

5. Вероятностно-весовая модели нагрузки транспортного потока на основании данных о фактическом весовом составе потока проходящего транспорта;

6. Обоснование возможности применения современной проектной нагрузки A14 для проверки выносливости гибких штыревых упоров;

7. Алгоритм применения усовершенствованного метода проверки выносливости элементов объединения, включающий в себя возможность проведения уточненных расчетов с использованием данных вероятностно-весовой модели транспортного потока.

Апробация работы

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на всероссийских научно-практических конференциях «Инновации и долговечность объектов транспортной инфраструктуры» (СПбГАСУ) в 2019 и 2022 годах, международной научно-практической конференции «BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры» (СПбГАСУ) в 2021 году, международных научно-технических конференциях «Проектирование, строительство и эксплуатация мостов, тоннелей и метрополитенов» (РУТ

МИИТ) в 2021 и 2022 годах, научной встрече в Университете Минью (г. Гимарайнш, Португалия) в 2021 году, симпозиуме IABSE Prague (г. Прага, Чехия) в 2022 году.

Достоверность и обоснованность полученных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций, приведённых в диссертации, обоснована достаточным объёмом теоретических, численных и натуральных экспериментальных исследований, выполненных в ходе исследования работы рассматриваемых конструкций. При проведении теоретических исследований использовались определяющие уравнения теории усталости металлов и теории расчета сталежелезобетонных конструкций в мостостроении, которые приняты в современных стандартах и сводах правил. Численные расчёты выполнены с помощью сертифицированных программных комплексов SOFiStiK и ANSYS, основой которых является метод конечных элементов. При проведении экспериментальных исследований использовались современные методы, приборы и оборудование, позволяющие провести натурные измерения с допустимой степенью погрешности.

Внедрение результатов. Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «СПбГАСУ» при изучении дисциплин «Проектирование мостов» и «Основы надежности постоянных мостов».

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии во всех этапах диссертационного исследования, включая постановку задачи и выбор способов их решения, а именно: в проведении анализа материалов по теме исследования; в проведении качественного и количественного анализа существующих методик проверки выносливости, включая процесс анализа конечно-элементных моделей; в разработке усовершенствованного метода проверки выносливости; в подготовке программы натурных экспериментов; в подготовке измерительного оборудования и его установке на объект эксперимента; в проведении натурального эксперимента; в обработке экспериментальных данных, включая разработку программы пакетной обработки данных для ЭВМ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных статей, из которых 3 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертационных работ, 2 – в сборниках конференций, индексируемых в Scopus; получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем работы составляет 129 страниц машинописного текста. Диссертация содержит 28 таблиц, 66 рисунков, библиографический список из 182 источников, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи, объект и предмет исследования, раскрыта научная новизна, теоретическая значимость, практическая ценность исследования, а также изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены результаты комплексного анализа современного состояния вопросов, направленных на актуализацию и уточнение объекта и предмета исследования.

Рассмотрены современные тенденции развития конструкций СТЖБ ПС; сформулирована и предложена схема классификации элементов объединения, включающая в себя все используемые типы упоров (см. Рисунок 1).



Рисунок 1 – Система классификации элементов объединения СТЖБ ПС

Исследованы существующие в отечественной и зарубежной практике подходы к проверке выносливости как в целом стальных элементов, так и гибких штыревых упоров ЭО СТЖБ ПС. В результате анализа выявлены значительные отличия в применяемых в различных странах методах проверки выносливости.

Приведены результаты обоснования месторасположения определяющих элементов объединения с точки зрения обеспечения эксплуатационных характеристик СТЖБ ПС.

Проанализированы системы факторов, влияющих на результаты проверки выносливости. По результатам анализа предложена система наиболее важных параметров, которые необходимо учитывать в разрабатываемом методе проверки выносливости гибких штыревых упоров СТЖБ ПС автодорожных мостов (см. Таблица 1).

Таблица 1 – Система параметров функции выносливости

№	Группа	№	Параметр
1	Физические свойства материала	1.1	Предел прочности (σ_b)
		1.2	Предел выносливости (σ_{-1})
2	Состояние материала	2.1	Состояние поверхности материала
3	Свойства элемента	3.1	Масштабный фактор (μ_0)
		3.2	Форма и состояние поверхности (эффективные концентраторы напряжения, β)
		3.3	Или обобщающий с учетом п.1 и п.2: Предел выносливости для элемента (σ'_{-1})
4	Вид деформации	4.1	Сжатие, растяжение, изгиб и т.п.
5	Параметры режима нагружения и НДС	5.1	Максимальные (σ_{max}) и минимальные (σ_{min}) напряжения, а также коэффициент асимметрии (ρ) и размах ($\Delta\sigma$)
		5.2	Число циклов нагружения (N)
		5.3	Характер последовательности нагружений

Вторая глава посвящена разработке теоретических основ совершенствования метода проверки выносливости элементов объединения конструкций СТЖБ ПС.

Проведен комплексный анализ применяемых методик проверки выносливости и степени влияния входящих в них параметров выносливости (качественный анализ). Проанализированы методики проверки выносливости 8 стран и регионов (РФ, Евросоюз, США, Украина, Австралия, Канада, Япония, Китай), из которых определен набор 4-х базовых методик (РФ, Евросоюз, США и Украина). Результаты качественного анализа базовых методик подтверждают наличие значительных различий в методах, используемых в России и за рубежом; при этом ключевые отличия заключаются в модели применяемой проверки и, в первую очередь, в подходах к регулированию используемой модели путем корректировки входящих параметров.

На базе 5 моделей различных СТЖБ ПС автодорожных мостов (4-х отечественных эксплуатируемых и 1-го типового решения из европейских норм проектирования) проведен количественный анализ применяемых методик проверки выносливости гибких штыревых упоров по следующему алгоритму:

1. Анализ воздействия расчётных подвижных нагрузок на штыревые упоры с получением характеристик цикла нагружения;
2. Качественная проверка выносливости гибких штыревых упоров по четырем рассмотренным методикам для 3 режимов эксплуатации ($N = 2 \cdot 10^6$ циклов нагружения; проектное число циклов нагружения; условная неограниченная выносливость $N = 1 \cdot 10^8$).
3. Количественная проверка выносливости. Так как качественная проверка не позволяет получить количественные результаты (например, в коэффициентах использования нагрузки по массе или по числу циклов), дополнительно проведена количественная проверка выносливости. Для этого с использованием метода дождя произведён статистический анализ

результатов расчета воздействия подвижных нагрузок на штыревые упоры; по полученным данным о величине и числу циклов нагружения на основании гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений Пальмгрена-Майнера определены фактические повреждения элементов для соответствующих режимов.

Ввиду того, что существующий отечественный метод не дает возможности проводить проверку гибких штыревых упоров, при проведении сравнительного анализа с зарубежными методиками в существующую отечественную методику были внесены следующие модификации:

1. Используемый коэффициент эффективной концентрации напряжений β принят равным $\beta=3,5$ в соответствии с результатами ранее проведённых отечественных исследований.

2. Для возможности учета проектного числа циклов нагруженности использован коэффициент учёта числа циклов k_N , позволяющий произвести перерасчет пределов выносливости по кривой усталости, аналогично подходу, используемому в нормах EN.

Качественная проверка выносливости успешно проведена: для всех 5 объектов по всем методикам при базовом режиме эксплуатации; для всех объектов кроме одного по одной из методик – при проектном режиме. При режиме условной неограниченной выносливости условия проверки не выполнены для 4 случаев. Результаты качественного анализа позволяют сделать следующие выводы:

– нагрузки A14 и FLM3 (из СП и EN соответственно) в большинстве случаев являются значительно более повреждающими, чем эталонная нагрузка в виде 50-тонного автопоезда, а нагрузка A15 из ДБН по порядку величин накопления повреждений близка к эталонной нагрузке;

– нагрузка Fatigue Truck из AASHTO вызывает повреждения по величине сравнительно близкие к повреждениям от эталонной нагрузки, что подтверждает приближенность ее модели к реальным транспортным средствам;

– «европейские» методики проверок EN и ДБН характеризуются схожей чувствительностью как к особенностям конструкций, так и к режиму эксплуатации;

– «американская» методика проверки по нормам AASHTO характеризуется значительно большей чувствительностью к режиму эксплуатации;

– отечественная методика проверки в целом близка по показателям к «европейским», но характеризуется большей чувствительностью к режиму эксплуатации при проверке по числу циклов, а также большей чувствительностью к типу конструкции при проверке по величине нагрузки, что, вероятнее всего, объясняется особенностями используемых расчетных нагрузок с «распределенной частью».

Проведен анализ теоретических основ отечественной и применяемых западных методов проверки выносливости. На основе результатов

проведенного количественного анализа сформулированы предложения по совершенствованию существующего отечественного метода проверки выносливости гибких штыревых упоров, позволяющие объективно учитывать сопротивление усталости элементов объединения при фактических режимах нагруженности (формулы 1-6).

$$\tau \leq \tau_{\text{вын}} = k_N \cdot \gamma'_{w,\tau} \cdot (0,75 \cdot R_y) \cdot m, \quad (1)$$

$$k_N(N) = \sqrt[8]{\frac{2 \cdot 10^6}{N}}, \quad (2)$$

$$N = T_s \cdot 365 \cdot N_d \cdot N_L, \quad (3)$$

$$\gamma'_{w,\tau} = \frac{1}{\zeta \cdot \mathcal{G}} \cdot \frac{1}{[(A_0 + B_0) - (A_0 - B_0) \cdot \rho]}, \quad (4)$$

$$A_0 = \frac{1}{\Delta \tau_C} \cdot R_y \cdot \left[\frac{k_2}{\xi_2} \right], \quad (5)$$

$$B_0 = \frac{R_y}{2 \cdot \sigma_b} \cdot [k_2]. \quad (6)$$

В формуле (1): R_y – расчетное сопротивление стали; m – коэффициент условий работы; в (2) и (3): N – проектное число циклов, определяемое по формуле; T_s – проектный срок эксплуатации, лет; N_d – проектная интенсивность тяжелых транспортных средств за 1 сутки, ед/сут; N_L – расчетное число циклов в рассматриваемом элементе за 1 проход нагрузки; в (4): $\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = \tau_{\min} / \tau_{\max}$ – коэффициенты асимметрии цикла переменных напряжений; A_0 – коэффициент, определяющий сопротивление усталости элемента; B_0 – коэффициент, учитывающий прочностные свойства материала (для стали 09Г2С может быть принят равным 0,35); в (5) и (6): $\Delta \tau_C$ – расчетное сопротивление элемента усталости (для проверки гибких штыревых упоров по касательным напряжениям принимается равным 90 МПа); σ_b – предел прочности стали; k_2 – величина рассеяния лабораторных данных при эксперименте (при наличии, по умолчанию $k_2 = 1$); ξ_2 – коэффициент режима для автодорожных мостов (при наличии, по умолчанию $\xi_2 = 1$); $\zeta = 1$ – понижающий коэффициент (при наличии обоснования может быть принят отличным от 1); \mathcal{G} – коэффициент, учитывающий длину линии влияния.

Для наиболее распространенных в практике проектирования конструкций гибких штыревых упоров часть параметров может быть принята следующими: $\Delta \tau_C = 90$ МПа; $R_y = 345$ МПа; $\sigma_b = 490$ МПа; $\xi_2 = k_2 = 1$; $A_0 = 345/90=3,83$; $B_0 = 345/2 \cdot 490 = 0,35$. Для сравнения, по существующему общему методу СП 35.13330.2011 при $\beta = 3,5$ коэффициенту A_0 соответствует произведение коэффициентов $\alpha \cdot \beta = 2,52$, коэффициенту B_0 – коэффициент $\delta = 0,24$.

Блок-схема предложенной функции проверки выносливости приведена на рисунке 2.

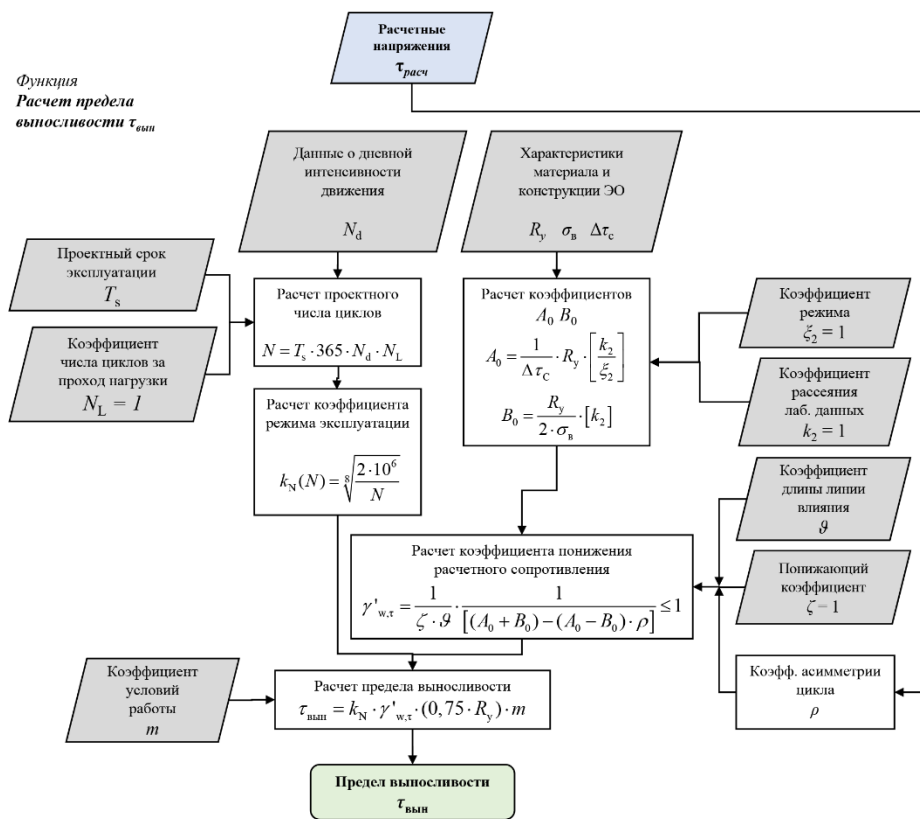


Рисунок 2 – Блок-схема функции расчета предела выносливости

В третьей главе проанализированы результаты экспериментальных исследований (подготовки, проведения и обработки данных натурального эксперимента) эксплуатируемого моста с целью определения и уточнения ряда параметров усовершенствованного метода проверки выносливости гибких штыревых упоров СТЖБ ПС.

Приведены сведения об объекте эксперимента (автодорожный мост с СТЖБ ПС через реку Вуокса, расположенный на а/д А-181), использованных измерительных системах и методике проведения натурального эксперимента (см. Рисунок 3); приведены результаты конечно-элементного моделирования работы объекта эксперимента на макро- и микроуровнях (модели пролетного строения и узла элемента объединения соответственно), позволившие получить опорные значения для дальнейшего анализа результатов эксперимента, проведенного в два этапа.

На первом (активном) этапе нагрузка в виде крана на грузовом шасси осуществляла движение в контролируемом режиме с разными скоростями; во

время второго (пассивного) этапа по мосту осуществлялось нерегулируемое движение потоков обычного транспорта, а измерения производились непрерывно в течении 5 дней.

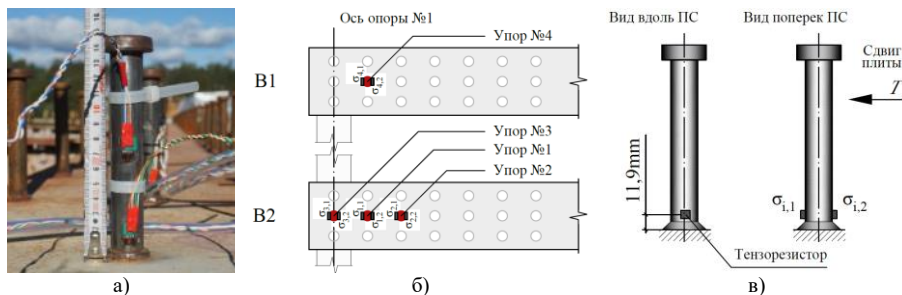


Рисунок 3 – Тензорезисторы, установленные на гибкие штыревые упоры (а) и схема установки тензорезисторов (б, в)

Приведены наиболее характерные результаты проведенного эксперимента с первичной обработкой в виде тензограмм для первого (см. Рисунок 4) и второго (см. Рисунок 5) этапов эксперимента. Проведено сопоставление экспериментальные данных и результатов анализа конечно-элементных моделей. По результатам сопоставления сделан вывод о корректности использования существующей инженерной методики моделирования работы элементов объединения.

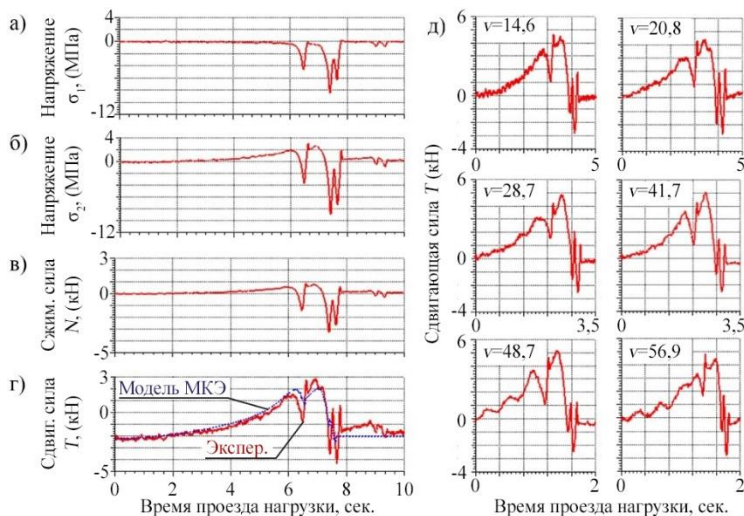


Рисунок 4 – Характерные диаграммы напряжений и усилий на упоры (а-г) и диаграммы сдвигающих сил в зависимости от скорости движения (д) (для упора №1)

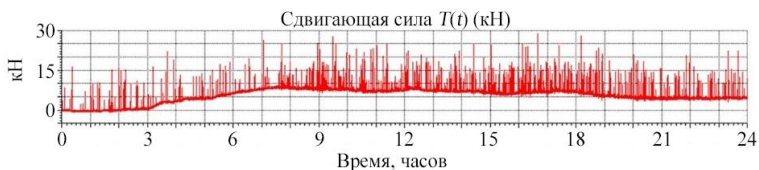


Рисунок 5 – Характерные диаграммы фактических сдвигающих сил на упор за сутки

При проведении сравнительного анализа величин накопленных повреждений элементов объединения от воздействия проектных и фактических транспортных нагрузок сделан вывод, что величины повреждений от воздействия нагрузок по СП и EN характеризуются одним порядком с величинами от фактических нагрузок (см. Таблица 2).

Таблица 2 – Величины накопления повреждений за сутки

Нагрузка	Экспер. (ср. знач.)	A14 (СП)	FLM3 (EN)	A15 (ДБН)	Автоезд 50т
Повреждения $\times 10^{-6}$ (ед./сут.)	3,60	4,65	8,53	0,07	0,29

На основании результатов обработки экспериментальных данных (см. Рисунок 6), сделано предложение о необходимости применения повышенных динамических коэффициентов для ЭО СТЖБ ПС вблизи деформационных швов. Для количественного определения расчетного коэффициента $(1+\mu)_T$ с учетом зарубежного опыта предложено использовать формулу 7.

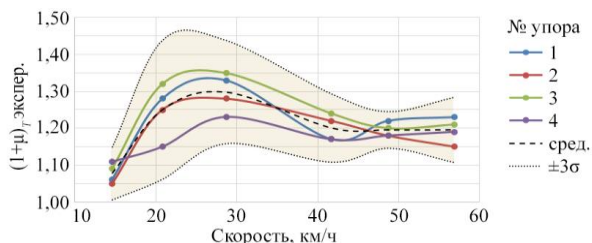


Рисунок 6 – Зависимость между фактическим динамическим коэффициентом сдвигающих усилий и скоростью транспорта.

$$(1 + \mu)_T = 1,67 \cdot (1 - D / 24,44) \geq 1,26, \quad (7)$$

где D – расстояние от проверяемого элемента конструкции до деформационного шва (в метрах).

По результатам сопоставления выявленного количества циклов изменения сдвигающих усилий и данных о фактической интенсивности движения установлено, что значение коэффициента количества циклов нагружения за один проход нагрузки с достаточной точностью может приниматься равным $N_L = 1$.

В четвертой главе диссертации приведены результаты исследования по обоснованию расчетных нагрузок для выполнения проверки выносливости и разработки усовершенствованного алгоритма проверки выносливости гибких штыревых упоров СТЖБ ПС автодорожных мостов.

Приведено теоретическое обоснование метода подбора расчетной нагрузки с использованием основ теории надежности строительных конструкций и сформулированы условия решаемой задачи (см. Формулы 8,9):

$$D_{\text{расч}}^{(\text{экв.})}(LM) \leq D_{\text{расч}}^{(M)}, \quad (8)$$

$$D_{\text{расч}}^{(\text{экв.})}(LM) \leq D_{\text{пред}} = 1, \quad (9)$$

где $D_{\text{расч}}^{(\text{экв.})}(LM)$ – повреждение за 1 проход расчетной нагрузки; $D_{\text{расч}}^{(M)}$ – повреждение за 1 проход вероятностно-весаовой модели нагрузки; $D_{\text{пред}} = 1$ – критерий наступления усталостного разрушения.

Основываясь на выборке результатов исследований весового состава транспортного потока ряда регионов и стран, разработана вероятностно-весаовая модель нагрузки от транспортного потока, учитывающая случайное распределение веса транспортных средств (ТС) и статистическую изменчивость величины динамического коэффициента (см. Рисунок 7). Далее рассмотренные в предыдущих главах 5 расчетных моделей СТЖБ ПС проанализированы с целью определения величины ожидаемых повреждений при воздействии данной модели нагрузки (см. Формулу 10).

$$d_i = \sum_{p1 \in P_1} \sum_{p2 \in P_2} d_{i,p1,p2} \cdot p_{p1,p2}, \quad (10)$$

где d_i – повреждение за 1 «проход» модели нагрузки; P_1, P_2 – множества возможных значений массы нагрузки и величины $(1+\mu)_T$ при «проходе» нагрузки; $d_{i,p1,p2}$ – повреждение за 1 «проход» нагрузки массой $p1$ с $(1+\mu)_T = p2$; $p_{i,p1,p2}$ – вероятность прохода нагрузки данной комбинации.

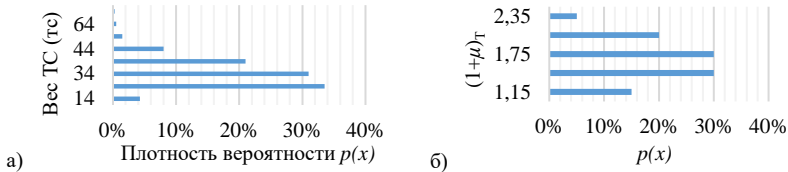


Рисунок 7 – Параметры модели нагрузки транспортного потока: а) вероятностно-весаовая диаграмма; б) диаграмма изменчивости динамического коэффициента $(1+\mu)_T$

За базовую модель расчётной нагрузки в целях унификации проведения проверочных расчетов принята стандартная модель подвижной нагрузки АК. Подтверждена возможность использования нагрузки А14 как основной для проведения проверки выносливости в первом приближении; при этом отмечается, что нагрузка А14 в ряде случаев может быть избыточной для проверки выносливости. Предложено в случае невыполнения условия проверки с использованием нагрузки А14 проводить уточнённую проверку выносливости с использованием вероятностно-весаовой модели транспортного потока (см. Рисунок 8). В таблице 3 структурированы требования к исходным данным для выполнения проверки выносливости по разработанному методу.

Таблица 3 – Исходные данные для выполнения проверки выносливости гибких штыревых упоров

Исходные данные	Исходные данные		Значение по умолчанию
Расчетные нагрузки	Расчетные нагрузки		A14
	Фактический весовой состав движения		*
Прочностные свойства конструктивных решений ЭО	Расчетное сопротивление материала		R_y $R_y = 345$ МПа
	Предел прочности материала		σ_b $\sigma_b = 490$ МПа
	Предельный размах напряжений при симметричном цикле для $N = 2 \cdot 10^6$		$\Delta\tau_c$ $\Delta\tau_c = 90$ МПа
	Коэфф. рассеяния лабораторных данных		k_2 $k_2 = 1$
	Коэффициент режима		ξ_2 $\xi_2 = 1$
Расположение ЭО	Динамический коэффициент к расчетным нагрузкам	$(1+\mu)_T$	$(1+\mu)_T = 1,26 \dots \dots 1,67$
Особенности конструкции ПС	Коэфф. числа циклов за проход нагрузки		N_L $N_L = 1$
	Коэффициент учета длины линии влияния		ϑ **
Особенности режима эксплуатации моста	Коэффициент условий работы		m $m = 1$
	Проектный срок эксплуатации		T_s $T_s = 100$ лет
	Расчетная интенсивность движения		N_d *
	Понижающий коэффициент		ζ $\zeta = 1,00$

Примечание: * по результатам изысканий интенсивности и состава движения; ** длина загрузки линии влияния.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполненный комплексный анализ развития и совершенствования конструктивных решений сталежелезобетонных пролетных строений (СТЖБ ПС) автодорожных (а/д) мостов и результаты их эксплуатации показывают, что наиболее широкое распространение в качестве элементов объединения (ЭО) железобетонных плит проезжей части и металлических балок получили гибкие упруго-податливые элементы объединения (гибкие штыревые упоры), позволяющие более успешно решать возникающие в процессе эксплуатации ПС проблемы их эксплуатационной надёжности (дефекты и повреждения в виде трещин в плите проезжей части, провисание балок ПС, усталостные разрушения и т.п.);

2. В настоящее время отечественная нормативная база проектирования мостов не регламентирует необходимость проверки выносливости гибких штыревых упоров в конструкциях СТЖБ ПС а/д мостов, несмотря на нестационарный характер их работы, при этом большинство зарубежных методик предписывают необходимость проверки выносливости. Актуальным является вопрос экспериментально-теоретического совершенствования метода проверки выносливости гибких штыревых упоров при воздействии динамических нестационарных временных нагрузок;

3. Результаты комплексного качественного анализ существующих методик подтвердили наличие значительных различий в нормах, используемых в России и за рубежом, при этом отмечено, что основные отличия заключаются в инструментах регулирования используемого метода путем корректировки входящих параметров. Существующая отечественная

методика из рассмотренных наименее приспособлен к учету фактических режимов нагруженности ЭО СТЖБ ПС а/д мостов;

4. Результаты комплексного количественного анализа существующих методик на базе 5 моделей различных конструкций СТЖБ ПС а/д мостов подтвердили принципиальную целесообразность проведения проверки выносливости ЭО СТЖБ ПС;

5. На базе результатов проведённого исследования разработан усовершенствованный метод проверки выносливости, позволяющий существенно расширить область его применения, в том числе и для проверки выносливости гибких штыревых упоров; в качестве исходных данных в данном методе используется не предел выносливости материала ЭО, а полученные экспериментально значения предела выносливости для конкретного элемента (с учетом концентраторов напряжений, возможных остаточных напряжений и т.п.). При этом усовершенствованный метод проверки выносливости позволяет учитывать фактический режим нагруженности элемента и проводить проверку на различное количество циклов загрузки (формулы 1-6);

6. На основе результатов проведенных натурных испытаний эксплуатируемого автодорожного моста через реку Вуокса на а/д А-181 экспериментально подтверждена адекватность существующих методов математического и конечно-элементного моделирования работы гибких штыревых упоров СТЖБ ПС, позволяющих с достаточной точностью прогнозировать фактическое напряженно-деформированное состояние гибких штыревых упоров объединения конструкций СТЖБ ПС;

7. С использованием результатов проведенных натурных экспериментов на существующем эксплуатируемом а/д мосту обоснована необходимость назначения при проектировании повышенного динамического коэффициента сдвигающих усилий $(1+\mu)_T$ для элементов объединения, расположенных вблизи деформационных швов;

8. Предложен алгоритм назначения величины повышенного динамического коэффициента сдвигающих усилий $(1+\mu)_T$ по формуле (7);

9. С использованием результатов проведенных натурных экспериментов на существующем эксплуатируемом автодорожном мосту для гибких штыревых упоров в надпорной зоне экспериментально обосновано значение коэффициента количества циклов нагружения за один проход нагрузки $N_L = 1$;

10. На основе сравнительного анализа теоретических и ожидаемых повреждений от расчетных проектных нагрузок и проходящих временных нагрузок на эксплуатируемом автодорожном мосту установлена принципиальная возможность использования модели нагрузки А14 в качестве расчетной при определении выносливости элементов объединения СТЖБ ПС автодорожных мостов;

11. По результатам проведённого теоретического исследования обоснована расчетная нагрузка для предлагаемого усовершенствованного метода проверки выносливости гибких штыревых упоров. Численно

подтверждена возможность использования в качестве расчетной временной нагрузки А14 в первом приближении. С учетом того, что в ряде случаев при проведении проверки выносливости нагрузка А14 может быть чрезмерной, для уточняющего расчета при невыполнении условий проверки в первом приближении разработан уточненный алгоритм расчета с использованием вероятностно-весовой модели нагрузки от фактического транспортного потока.

Внедрение результатов исследования в практику реального проектирования конструкций СТЖБ ПС позволит уточнить их расчет и тем самым повысить качество, эксплуатационную надежность и долговечность автодорожных мостов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Быстров В.А. Проблемы обоснования режимов фактической динамической нагруженности и ресурса долговечности конструкций сталежелезобетонных автодорожных и городских мостов / В.А. Быстров, Н.В. Козак, Д.А. Ярошутин // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2019. – Т. 6. – № 4. – DOI: 10.15862/06SATS419. – EDN: GBIJSS.

2. Козак Н.В. Комплексный анализ существующих методик проверки выносливости гибких штыревых упоров сталежелезобетонных автодорожных мостов по нормативам ряда стран / Н.В. Козак // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2021. – Т. 8. — № 2. – DOI: 10.15862/10SATS221. – EDN: MRLPEF.

3. Козак Н.В. Экспериментальное исследование режима работы гибких штыревых упоров сталежелезобетонного пролётного строения существующего автодорожного моста. / Н.В. Козак // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2022. – Т. 9. – № 1. – DOI: 10.15862/07SATS122. – EDN: CLALTW.

В изданиях с индексацией в Scopus

4. Kozak N.V. Modeling of live load influence in analysis of bridge structures endurance / N.V. Kozak // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 832. – DOI: 10.1088/1757-899X/832/1/012025.

5. Improving of fatigue assessment method of stud shear connectors using experimental data from studs' test of existing road bridge / N. Kozak [и др.] // Proceedings of IABSE Symposium Prague 2022: Challenges for Existing and Oncoming Structures. – Prague: IABSE, 2022. – С. 224-234. – DOI: 10.2749/prague.2022.0224.

В других изданиях:

6. Козак Н.В. Сравнительный анализ отечественных и зарубежных норм проектирования в области расчетов элементов на выносливость / Н.В. Козак // Инновации и долговечность объектов транспортной инфраструктуры (материалы, конструкции, технологии): материалы научно-практической

конференции. Под редакцией М. П. Клековкиной. / СПбГАСУ. – СПб, 2019. – С. 92-97. – EDN: EYBIYT.

7. Козак Н.В. Особенности формирования расчетных загружений и оценки выносливости элементов мостовых сооружений по принятым методикам некоторых стран / Н.В. Козак, В.А. Быстров // Строительство: новые технологии - новое оборудование. – 2019. – № 12. – С. 8-14. – EDN: FFLXPR.

8. Козак Н.В. Моделирование и анализ работы неразрезных балок мостов под действием нестационарных нагрузок / Н.В. Козак // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: материалы Тринадцатой Международной конференции / ТГУ, – Томск, 2020. – С.33-34. – EDN: BQFTHT.

9. Козак Н.В. Сравнительный анализ КЭ моделей и оптимизация построения поверхностей влияния для элементов объединения сталежелезобетонных пролетных строений с использованием SOFiStiK и Python / Н.В. Козак // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы IV Международной научно-практической конференции 21-23 апреля 2021 г. / СПбГАСУ. – СПб, 2021. – С. 148-156. – DOI: 10.23968/BIMAC.2021.019. – EDN: QJLRXF

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:

10. Козак Н.В. Программа обработки результатов тензомониторинга «ТензоАнализ». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022613739, дата регистрации 07.06.2021.