На правах рукописи

ДЬЯЧЕНКО Леонид Константинович

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАЗРЕЗНЫХ БАЛОЧНЫХ ПРОЛЁТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ

Специальность 05.23.11 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Научный руководитель: **Смирнов Владимир Николаевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Поляков Владимир Юрьевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Мосты и тоннели»
ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)»

Яшнов Андрей Николаевич
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Мосты» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Ведущая организация: Закрытое акционерное общество «Нормативно-Испытательный Центр «Мосты»

Защита состоится «26» декабря 2017 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 999.174.02 на базе федеральных государственных бюджетных образовательных учреждений высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» и «Томский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191, ауд. 224.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского государственного университета путей сообщения (www.stu.ru).

Отзывы на диссертацию и автореферат диссертации с указанием ФИО, почтового адреса, телефона, адреса электронной почты, наименования организации и должности, подписанные и заверенные печатью организации, в двух экземплярах просим направить в адрес диссертационного совета.

Автореферат разослан «15» ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент Соловьев Леонид Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из основных направлений и принципов модернизации и развития железнодорожного транспорта в РФ на ближайшую перспективу является строительство высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ) со скоростями движения поездов свыше 250 км/ч. Как показывает мировой опыт, доля протяжённости мостовых сооружений в составе ВСМ значительно выше, чем на обычных железных дорогах. Это обуславливает их высокую удельную стоимость, а, следовательно, определяет предпосылки к совершенствованию методов расчёта и проектирования искусственных сооружений с целью оптимизации их основных технико-экономических параметров.

В отличие от обычных железнодорожных линий, при проектировании искусственных сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях, наряду с традиционными требованиями обеспечения надёжности и долговечности, определяющими задачами исследований становятся динамические режимы колебаний пролетных строений, вопросы надежности взаимодействия колеса и рельса и обеспечения комфорта и безопасности проезда пассажиров.

Динамические процессы, сопровождающие движение поезда по мосту, в существенной мере определяют конструкцию, материал, размеры сечений, жесткость отдельных элементов и сооружения в целом. Ввиду отсутствия российских экспериментальных и опытных данных, проектирование мостовых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях должно выполняться на основе расчётов и численного моделирования динамического взаимодействия единой системы «мост-поезд» со скоростями движения до 400 км/ч.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие методов учета динамического воздействия нагрузки при проектировании мостов внесли работы отечественных ученых А. Г. Барченкова, С. А. Бернштейна, В. В. Болотина, Н. Г. Бондаря, Г. П. Бурчака, И. И. Гольденблата, Е.Е. Гибшмана, С. А. Ильясевича, И. И. Казея, К. Е. Китаева, Ю. Г. Козьмина, С. И. Конашенко, Б. Ф. Лесохина, А. Б. Моргаевского, С. С. Норейко, Я. Г. Пановко, А. П. Филиппова, Г. Н. Яковлева и многих других. Следует отметить большое значение работ по развитию методов расчета и проектирования мостов при динамическом воздействии учёных МИИТа: И. И. Иванченко, В. М. Круглова, Е. Н. Курбацкого, В. Ю. Полякова, В. М. Фридкина, а также ПГУПСа (ЛИИЖТа) и НИИ мостов: Б. Н. Васильева, С.Р. Владимирского, А. Г. Доильницына, А. В. Индейкина, В. В. Кондратова, М. Д. Никольского, В. Н. Смирнова, О. Д. Тананайко, С. Ю. Чудновского. Совершенствованию методов динамического расчёта мостов на ВСМ посвящены труды зарубежных исследователей R. Calçada, R. Delgado, J. Domínguez, L. Fryba, J. M. Goicoler, Y. S. Wu, H. Xia, Y. B. Yang, J. D. Yau и других.

В последние годы интерес к высокоскоростному железнодорожному движению значительно вырос, что связано прежде всего с решением о

строительстве магистрали «Москва-Казань». Вместе с тем, круг вопросов, в рамках проблемы взаимодействия мостов и подвижного состава, весьма широк. При этом первостепенное значение имеют такие ее аспекты, как: исследование физических основ возникновения и развития динамических процессов, протекающих в элементах мостов и подвижного состава при их взаимодействии; выбор рациональных расчетных схем и соответствующих им математических моделей системы «мост-поезд»; выявление и анализ условий, при которых динамические деформации и перемещения в этой системе имеют наиболее неблагоприятный в эксплуатации характер; разработка требований к элементам мостовых сооружений, обеспечивающих безопасность и плавность прохода поездов.

Целью настоящей работы является повышение качества проектирования разрезных балочных пролётных строений мостов в условиях высокоскоростного движения путём разработки прикладной методики их динамического расчёта и практических рекомендаций по назначению основных динамических параметров.

Основные **задачи** исследования**:**

- выполнение численного моделирования динамического взаимодействия разрезных балочных пролётных строений мостов и высокоскоростного подвижного состава со скоростями движения до 400 км/ч;
- определение влияния основных параметров разрезных балочных пролётных строений мостов (длина пролёта, материал конструкции, вертикальная жёсткость, погонная масса, собственные частоты колебаний) и подвижного состава (схема поезда, собственные частоты колебаний) на характер их динамического взаимодействия;
- обоснование предельных деформаций и нормирование вертикальной жёсткости разрезных балочных пролётных строений мостов, как критерия обеспечения комфортности и безопасности движения высокоскоростных поездов;
- разработка и обоснование рекомендаций по ограничению нижнего предела первой собственной частоты колебаний и минимального значения погонной массы разрезных балочных пролётных строений мостов на основании критерия обеспечения стабильности верхнего строения пути на сооружении;
- разработка прикладной инженерной методики и алгоритма динамического расчёта разрезных балочных пролётных строений мостов при воздействии высокоскоростного подвижного состава.

Объектом исследования являются разрезные балочные пролётные строения мостов и эстакад, расположенные на высокоскоростных железнодорожных магистралях в условиях движения поездов со скоростями до 400 км/ч.

Предметом исследования являются динамические эффекты (колебания), возникающие в конструкциях разрезных балочных пролётных строений мостовых сооружений, вагонах подвижного состава, а также на контакте «колесо-рельс» при движении высокоскоростных поездов.

Методология и методы исследования базируются на системном подходе к проблеме обеспечения надёжности, безопасности и комфортности пассажиров

при движении высокоскоростного подвижного состава по мостовым сооружениям. В качестве основного инструмента исследования в работе используются методы математического моделирования с использованием численных и аналитических методов строительной механики.

Научная новизна исследования:

▪обоснована необходимость определения основных параметров подвижного состава при разработке задания на проектирование мостовых сооружений, что обуславливает возможность оптимизации конструктивных решений и существенный экономический эффект при строительстве всей магистрали;

▪на основе критерия комфортности проезда пассажиров разработаны требования по ограничению допустимой величины относительного вертикального прогиба от нормативной временной нагрузки для скоростных режимов поездов до 400 км/ч и предложена система коэффициентов, учитывающих количество пролётных строений в составе сооружения;

▪с целью сокращения трудозатрат на проектирование и минимизации динамического воздействия временной нагрузки на разрезные балочные пролётные строения при скоростях движения поездов до 400 км/ч предложены рекомендации по ограничению нижнего предела собственных частот колебаний и минимальной погонной массы пролётных строений различной длины;

▪предложена инженерная методика динамического расчёта и обоснован дифференцированный подход к определению основных факторов напряжённо-деформированного состояния разрезных балочных пролётных строений при воздействии высокоскоростного подвижного состава.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов заключается в возможности:

▪исследования динамических процессов, возникающих в разрезных балочных пролётных строений мостов и подвижном составе при их взаимодействии;

▪выявления и анализа реакции элементов исследуемой системы «мост-поезд», а также условий, при которых колебания пролётных строений мостов и экипажей поезда имеют наиболее неблагоприятный характер;

▪разработки инженерной методики динамического расчёта разрезных балочных пролётных строений при динамическом воздействии высокоскоростных поездов без использования численного моделирования;

▪разработки рекомендаций по назначению минимальной массы разрезных балочных пролётных строений мостов;

▪разработки рекомендаций по назначению нижнего предела собственных частот колебаний разрезных балочных пролётных строений мостов;

▪нормирования вертикальной жёсткости разрезных балочных пролётных строений мостов.

Разработанные модели и методики были **внедрены** и использованы при выполнении работ по:

▪разработке «Концепции применения конструкций пролётных строений и опор мостов, эстакад и путепроводов железнодорожных высокоскоростных магистралей (ВСМ2)» в рамках обоснования инвестиций строительства ВСМ

Москва-Казань, выполненной АО «Ленгипротранс» (ФГБОУ ВО ПГУПС, 2013 год);

▪разработке Специальных технических условий «Сооружения искусственные участка Москва-Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва-Казань-Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству» (ФГБОУ ВО ПГУПС, 2014 год, актуализация 2016 года);

▪разработке «Методики и рекомендаций к расчёту. Динамическое взаимодействие подвижного состава и несущих конструкций искусственных сооружений на высокоскоростных магистралях» (ОАО «Институт «Гипростроймост», 2016 год);

▪научно-техническому сопровождению разработки проектной документации унифицированных пролётных строений мостов для строительства участка Москва-Казань высокоскоростной магистрали «Москва-Казань-Екатеринбург» (ФГБОУ ВО ПГУПС, 2015 год);

▪экспертной оценке и динамическим расчётам рамного пролётного строения по схеме 16+22+16 для высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва-Казань-Екатеринбург» (ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016 год);

▪разработке проектной документации системы мониторинга состояния искусственных сооружений в рамках титула «Участок Москва - Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва - Казань – Екатеринбург» (ВСМ -2)» (ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016-17 год);

▪расчетам искусственных сооружений на динамическое воздействие от высокоскоростных поездов в рамках титула «Строительство участка Москва - Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва - Казань – Екатеринбург» (ВСМ -2)» (ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016-17 год).

Личный вклад соискателя. Все исследования, изложенные в диссертационной работе, выполнены лично автором в процессе научной деятельности и научно-исследовательских работ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа динамического воздействия различных типов высокоскоростных поездов на конструкции разрезных балочных пролётных строений мостовых сооружений при скоростях движения до 400 км/ч;
2. Результаты анализа особенностей и динамических эффектов взаимодействия пролётных строений мостовых сооружений и подвижного состава при скоростях движения до 400 км/ч;
3. Обоснование предельных деформаций и нормирование вертикальной жёсткости разрезных балочных пролётных строений мостов;
4. Нормирование нижнего предела собственных частот колебаний разрезных балочных пролётных строений мостов;
5. Нормирование инерционных параметров разрезных балочных пролётных строений мостов;
6. Инженерная методика определения основных компонентов напряжённо-деформированного состояния разрезных балочных пролётных строений при динамическом воздействии высокоскоростных поездов.

Степень достоверности подтверждается:

▪апробированием математического аппарата, использованного при решении динамических задач с использованием численных методов;

▪верификацией результатов моделирования с использованием разработанных методик с результатами решения задач, имеющих аналитическое решение, результатами расчетов авторитетных отечественных и зарубежных специалистов, а также данными экспериментальных исследований при динамических испытаниях мостов на зарубежных высокоскоростных магистралях.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на Международной конференции «Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering» (DYN WIND 2017) в Словакии, Международных конференциях «Новые технологии в мостостроении» (Санкт-Петербург, ФГБОУ ВО ПГУПС, 2013-17 гг.), на X Международной конференции «Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте» (2017 г.), научных семинарах в ведущих проектных организациях АО «Трансмост», АО «Мосгипротранс», ОАО «Институт «Гипростроймост», а также на Всероссийских научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых. Неделя науки (Санкт-Петербург, ФГБОУ ВО ПГУПС, 2012-14 гг.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 12 статей в научных изданиях, из них 4 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы (213 наименований, в том числе – 142 на иностранных языках), 149 рисунков и 22 таблицы. Общий объем работы 191 страница.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко излагается степень разработанности проблемы исследования в настоящее время, обоснование актуальности работы, определение целей и задач исследований, а также приведены факторы, обуславливающие научную новизну, теоретическую и практическую значимость исследования, перечислены основные научные и практические результаты.

В первой главе изложены основные положения и требования к учёту динамических эффектов взаимодействия системы «мост-поезд» на высокоскоростных магистралях. Отмечено, что в настоящий момент в России и в мире отсутствуют нормативные документы, включающие рекомендации по проектированию и инженерные методики выполнения динамических расчётов искусственных сооружений на воздействие высокоскоростных поездов.

Приводится исторический обзор совершенствования и развития методов расчёта задач взаимодействия системы «мост-подвижной состав». Рассмотрены различные подходы к формированию расчётных моделей мостового сооружения и подвижного состава, а также современные методы решения

динамических задач, в том числе с использованием численных методов. Из приведенного обзора публикаций, посвященных исследованию динамической работы мостовых сооружений в условиях высокоскоростного движения, следует, что область применения действующих норм проектирования мостов на ВСМ ограничена скоростью до 350 км/ч, тогда как на ВСМ в России стоит директивная задача обеспечить движение поездов со скоростью до 400 км/ч.

Приводится анализ основных факторов динамического воздействия временной нагрузки на элементы мостовых сооружений в условиях высокоскоростного железнодорожного движения. Отмечено, что основным фактором динамического воздействия подвижного состава является пульсация прогибов пролётного строения, которая при высоких скоростях движения подвижного состава может иметь неблагоприятный резонансный характер.

Обзор нормативных требований при проектировании мостовых сооружений с учётом фактора динамического воздействия временной нагрузки показал, что в отличие от обычных железных дорог к искусственным сооружениям на ВСМ предъявляются особые требования, а именно:

- обеспечение стабильности верхнего строения пути на сооружении;
- ограничение частот вертикальных колебаний пролетных строений;
- контроль обезгруживания колес;
- контроль ускорений в вагонах поезда, обеспечение комфортности пассажиров.

Обобщающий анализ позволил сделать вывод о том, что отечественные и зарубежные методические разработки, позволяющие учитывать влияние скорости движения поездов на динамику элементов системы «мост-поезд», отличаются сложностью при их использовании для реального проектирования. Подход к назначению динамических коэффициентов, определяющих совокупность феноменов взаимодействия системы «мост-поезд», представленный в большинстве современных норм проектирования мостовых сооружений, является противоречивым с точки зрения методологии и физической природы и не имеет должной теоретической основы. Многолетняя практика учёта динамических эффектов при проектировании мостов, построенная на эмпирическом подходе, имеет весьма ограниченную область применения, и не может быть использована при проектировании мостовых сооружений для скоростей движения поездов более 200 км/ч.

Во второй главе приводится анализ основных параметров и характеристик мостовых сооружений на зарубежных и отечественных высокоскоростных железнодорожных магистралях. На основе мирового опыта показано, что мостовые сооружения составляют основную часть инфраструктуры ВСМ, зачастую 50% и более от общей протяжённости магистрали. Увеличение темпов строительства искусственных сооружений, как правило, сопряжено с необходимостью разработки унифицированных конструктивно-технологических решений. Отмечается, что применение типовых конструкций способствует резкому росту индустриализации пролётных строений и позволяет достичь высоких темпов сооружения многопролётных эстакад, составляющих основную долю искусственных сооружений на трассе.

Результаты, полученные в КНР в ходе экспериментальных и теоретических исследований, показали, что оптимальным вариантом для крупномасштабного строительства являются разрезные балочные пролётные строения. В результате сравнения различных подходов к проектированию пролётных строений на ВСМ в мире, при разработке проектной документации для ВСМ 2 «Москва-Казань» основным типом конструкции приняты разрезные балочные пролетные строения из предварительно-напряженного железобетона с ездой по верху полными длинами 23,6, 34,2 м и 50 м и сталежелезобетонные полными длинами 34,2 м и 50 м. Выбор разрезных балочных пролётных строений в качестве основного варианта для сооружений средних пролётов ВСМ в России определил область исследования настоящей диссертационной работы.

В третьей главе рассмотрены методологические основы решения задач диссертационной работы. При движении поезда по мосту на пролетные строения экипажами состава через колесные пары передаётся переменное силовое воздействие. При высоких скоростях движения поезда, частота силового воздействия поезда может совпадать с частотами собственных колебаний, что может привести к возникновению резонансных колебаний конструкций. Подвижной состав, в свою очередь, также испытывает динамическое возмущение при движении по деформированным под его воздействием конструкциям пролётных строений мостов. Таким образом, мост и движущийся по нему высокоскоростной поезд работают как единая система, что обуславливает необходимость решения задач их динамического взаимодействия. Описанные динамические эффекты приводят не только к увеличению усилий в элементах мостовых конструкций, но и оказывают неблагоприятное влияние на стабильность мостового полотна и комфортность пассажиров во время движения поездов по мостам на высокоскоростных железнодорожных магистралях.

Аналитическое решение динамической задачи пропуска движущейся нагрузки по сооружению представляется весьма трудоёмким. При реальном проектировании и расчётах рекомендуется использовать моделирование системы «мост-поезд» в программных комплексах, реализующих метод конечных элементов (МКЭ). Одним из наиболее распространённых методов решения задач динамики мостовых сооружений с применением МКЭ является метод прямого интегрирования с применением эффективных шаговых процедур. Данный метод, широко применяемый в зарубежных исследованиях, был использован в настоящей работе, как основной инструмент решения поставленных задач. Для численного моделирования динамических задач в ходе исследования использовался сертифицированный на территории РФ программный комплекс Sofistik.

Для исследования динамики пролётных строений мостов была использована аппроксимация реальной конструкции пространственными стержневыми элементами. Справедливость данного упрощения по сравнению с моделями из плоских конечных элементов доказывается соответствием вычисленных значений основных собственных частот и форм колебаний. В то же время использование стержневой модели значительно сокращает размерность задачи, а, следовательно, и время расчёта. При изучении

колебаний пролётных строений по первой вертикальной изгибной форме, вызванных движущейся поездной нагрузкой, как основного вида колебаний конструкций на ВСМ, представляется рациональным с точки зрения точности и практической применимости использование именно стержневых конечно-элементных моделей. При формировании расчетных динамических моделей рассматривались не фиксированные значения динамических характеристик (масса, изгибная жёсткость) и скоростей движения поезда, а возможные диапазоны их изменения. При моделировании мостовых сооружений в качестве параметра неупругого сопротивления использовался коэффициент демпфирования (или коэффициент затухания) ζ, выражаемый в процентах от критического демпфирования.

При выполнении практических инженерных расчётов в большинстве случаев для решения задачи прохождения подвижного состава по пролётному строению подвижная нагрузка может быть смоделирована в виде группы постоянных сил, соответствующей схеме высокоскоростного поезда (модель «подвижные силы на сооружении»). Получаемые результаты количественно и качественно характеризуют динамическую работу элементов конструкции пролетного строения и требуют минимальных трудозатрат. Однако, при этом решение не даёт информации о поведении подвижного состава. Использование модели «подвижные силы на сооружении» (рисунок 1) возможно при проектировании пролётных строений, удовлетворяющих критерию отсутствия под плитой проезда мест локального изменения жесткости. Важным критерием является соотношение масс пролётного строения и подвижного состава.

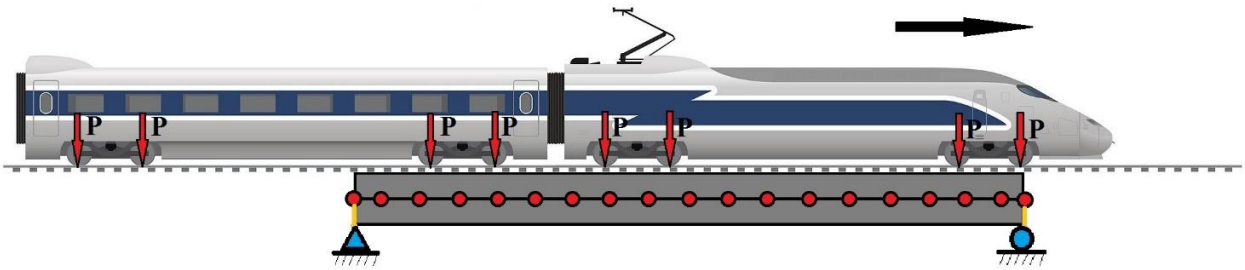


Рисунок 1 – Модель нагрузки «подвижные силы на сооружении»

Модель временной нагрузки «подвижные силы на сооружении» может быть использована только при расчёте массивных конструкций, погонный вес которых значительно превышает погонный вес подвижного состава. Проверки по критерию обеспечения безопасности и комфортности движения пассажиров поезда в этом случае обосновываются путём ограничения вертикальной жёсткости пролётных строений.

Пролетные строения, имеющие проезжую часть в виде балочной клетки, а также относительно «лёгкие» конструкции (погонный вес конструкции сопоставим с погонным весом подвижного состава) необходимо рассчитывать с использованием модели «подрессоренные массы на сооружении» (рисунок 2). Расчёт с учётом взаимодействия элементов системы «мост-поезд» требует значительных временных затрат при выполнении расчётов, однако позволяет максимально приблизить расчётную модель к реальным условиям. Результаты расчёта позволяют оценить не только динамическое воздействие подвижной

нагрузки на мостовые конструкции, но также исследовать эффекты, связанные с колебаниями подвижного состава при движении по пролётным строениям.

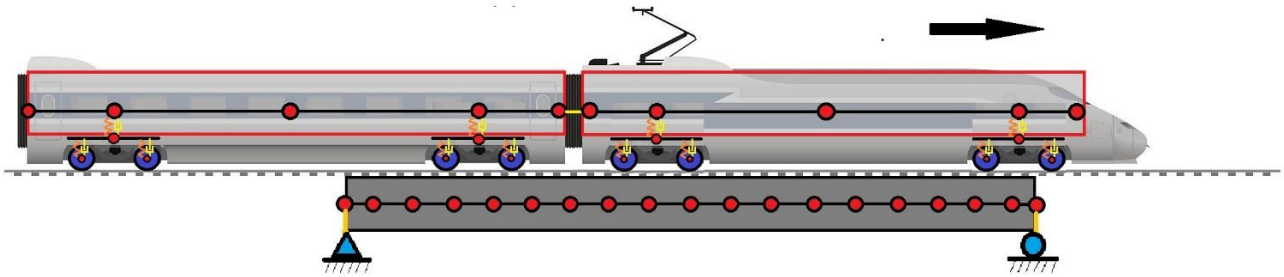


Рисунок 2 – Модель нагрузки «подрессоренные массы на сооружении»

В четвёртой главе приводятся основные результаты расчётов взаимодействия элементов системы «мост-поезд» в условиях высокоскоростного движения поездов с использованием методик «подвижные силы на сооружении» и «подрессоренные массы на сооружении». Доказано, что при назначении основных параметров конструкции (масса, жёсткость), определяющих значение частоты собственных колебаний, можно добиться вывода основного резонанса из зоны эксплуатационных скоростей. Вместе с тем, исключение кратных резонансов при расчётных скоростях движения более 300 км/ч, практически не представляется возможным. Характерный пример зависимости значений вертикальных ускорений в середине пролёта от скорости поезда представлен на рисунке 3. В ходе расчётов наряду с перемещениями середины пролёта разрезных балочных пролётных строений определялись основные усилия в конструкции, а именно изгибающий момент в середине пролёта и поперечная сила в опорном сечении.

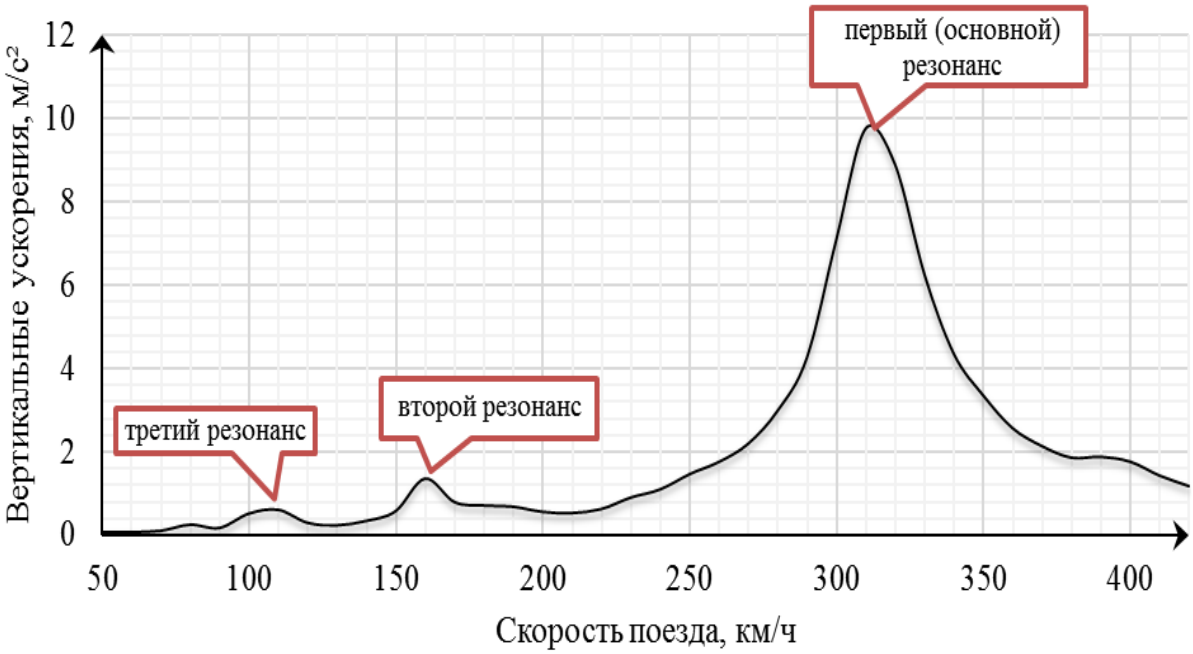


Рисунок 3 – Пример характерной зависимости значений вертикальных ускорений в середине пролёта от скорости поезда

Результаты выполненных динамических расчётов унифицированных пролётных строений мостов для высокоскоростной магистрали «Москва-Казань-Екатеринбург» продемонстрировали широкие возможности

варьирования динамических параметров конструкций (масса, жёсткость) для получения рациональных сечений при условии выполнения нормативных требований по ограничению вертикальных ускорений пролётных строений.

Выполненные автором расчёты показали, что значение массы пролётного строения не влияет на величину динамического коэффициента к временной нагрузке. Однако, при увеличении массы значение резонансных скоростей уменьшается пропорционально её значению, взятому под квадратным корнем. Вместе с тем, при уменьшении массы пролётного строения, значения вертикальных ускорений в середине пролёта увеличиваются. Установлено, что критические скорости, соответствующие резонансному режиму колебаний, возрастают пропорционально значению изгибной жёсткости, взятой под квадратным корнем. Повышение жёсткости пролётного строения не снижает величины динамического отклика конструкции, но позволяет «вывести» резонансный режим колебаний из области возможных эксплуатационных скоростей.

Поскольку допускаемые нормативные вертикальные ускорения проезжей части с безбалластным полотном выше (5,0 м/с^2), чем при езде на балласте (3,5 м/с^2), пролётные строения с мостовым полотном на плитах БМП находятся в более благоприятных условиях при эксплуатации. Также следует отметить, что пролёты длиной 16,5-27,6 м характеризует большие значения резонансных скоростей, по сравнению с пролётами 34,2-50,0 м. Это обстоятельство позволяет рекомендовать увеличение вертикальной жёсткости пролётных строений длиной до 30 м, как эффективный метод снижения динамической реакции конструкции. Для пролётов более 30 м основного резонанса избежать не удаётся, в связи с этим выполнения расчётных проверок необходимо добиваться путём увеличения массы пролётного строения.

На рисунках 4 и 5 представлены зависимости вертикальных прогибов и ускорений для характерных режимов динамической работы пролётного строения при воздействии высокоскоростного подвижного состава. В первом случае наблюдается основной резонансный режим колебаний пролётного строения. Амплитуды вертикальных прогибов в середине пролёта нарастают в течение всего времени нахождения высокоскоростного поезда на пролётном строении.

Во втором случае скорость движения поезда соответствует режиму «антирезонанса», когда каждая последующая осевая сила гасит колебания, вызванные предыдущей, и нарастания амплитуд колебаний не происходит. В итоге можно наблюдать колебания пролётного строения близкие к величине статических пульсаций при движении поезда с минимальной скоростью. Разница между рассмотренными скоростями движения поезда составляет всего 44,1 км/ч, в то время как реакция сооружения кардинально отличается. Исходя из указанных особенностей можно добиться значительного снижения динамической реакции конструкции при рациональном назначении её параметров.

При эксплуатации на линии спаренных составов высокоскоростных поездов динамическое воздействие на пролётные строения существенно увеличивается. Двукратное увеличение длины поезда (с 10 до 20 вагонов)

приводит к увеличению динамических перемещений на 28-56%, а ускорений на 39-66%. Таким образом, увеличение длины подвижного состава приводит к нелинейному нарастанию величины динамической реакции, при этом максимальные ускорения увеличиваются более интенсивно, чем прогибы.

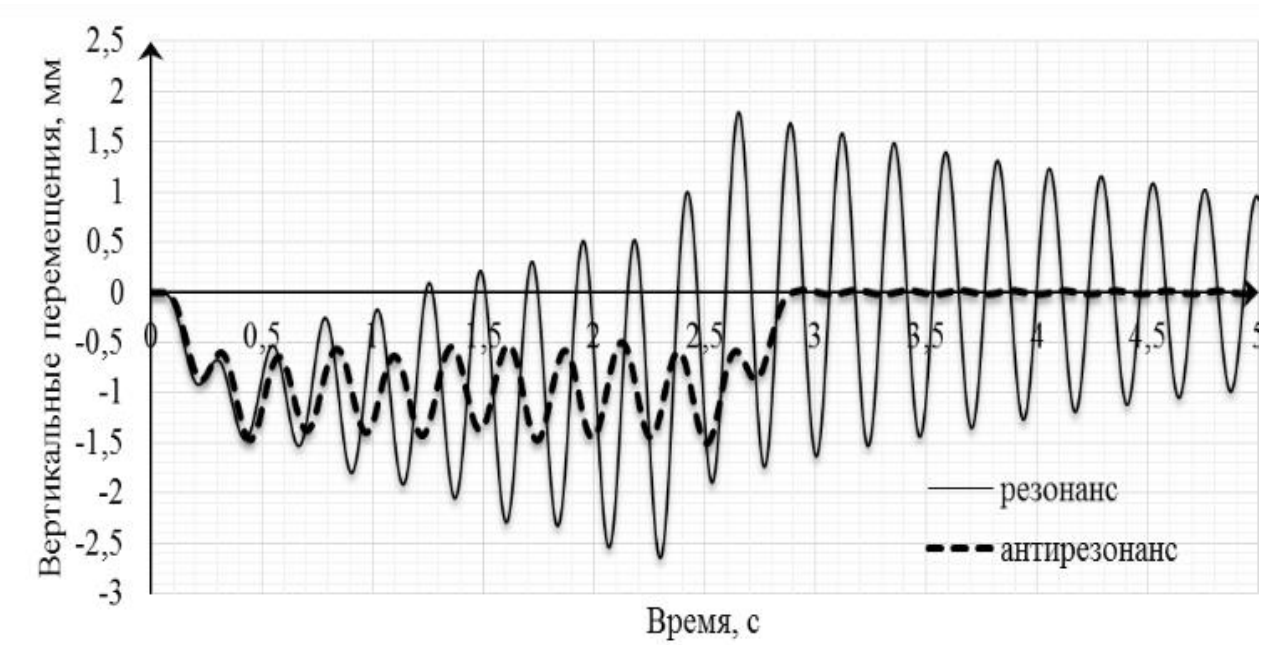


Рисунок 4 – График изменения вертикальных перемещений в середине пролётного строения, длиной 34,2 м при прохождении поезда ЭВС-1 «Сапсан» с резонансной (389,5 км/ч) и антирезонансной (345,4 км/ч) скоростью

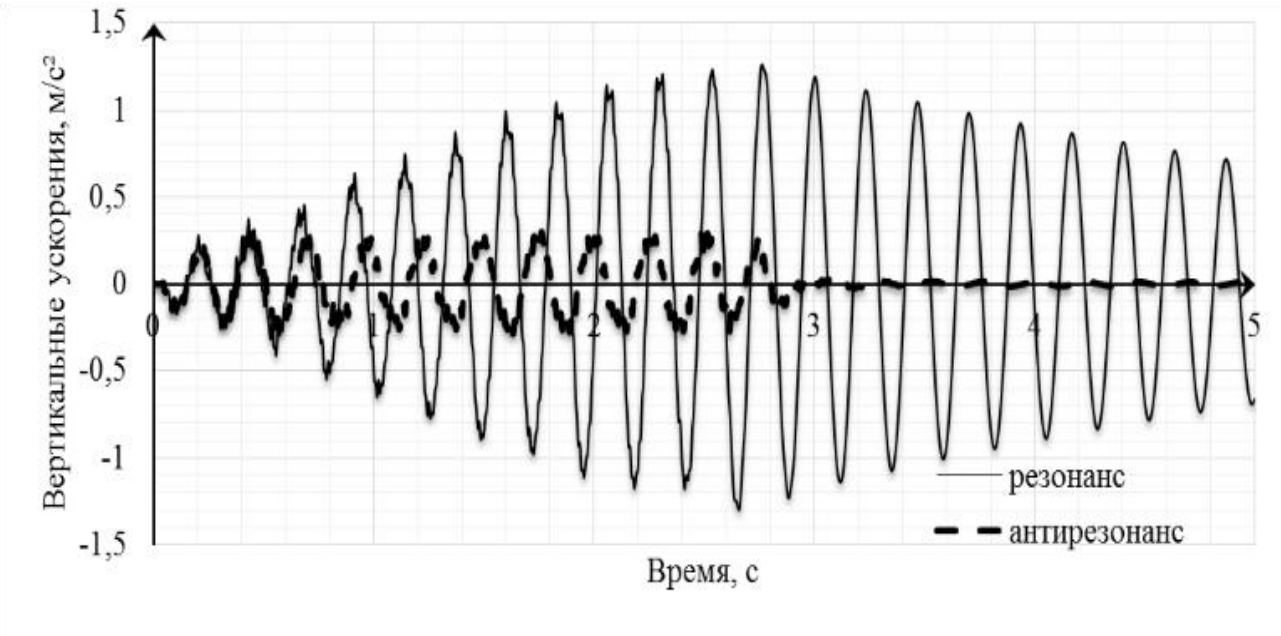


Рисунок 5 – График изменения вертикальных ускорений в середине пролётного строения, длиной 34,2 м при прохождении поезда ЭВС-1 «Сапсан» с резонансной (389,5 км/ч) и антирезонансной (345,4 км/ч) скоростью

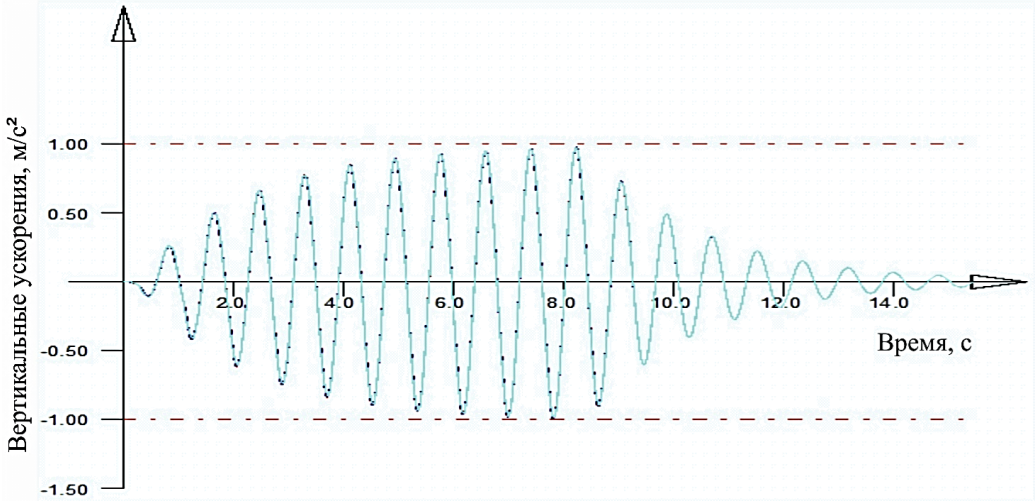
В ходе расчётов была выведена зависимость, позволяющая при расчетах пролетных строений с ездой на балласте учесть эффект распределения нагрузки между шпалами путём увеличения дополнительного демпфирования пролётного строения. Распределение осевой нагрузки от колёсных пар поезда

между шпалами, снижает величину динамического воздействия только для пролётов длиной менее 10 м.

Автором получены расчётные зависимости динамического коэффициента по прогибам к временной нагрузке от параметров конструкции и расчётного поезда, а также скорости его движения. Достоинством полученных зависимостей является возможность экспресс-анализа динамического воздействия расчётного высокоскоростного поезда.

В ходе исследования выполнены расчёты взаимодействия элементов системы «мост-поезд». В резонансном режиме колебаний вагонов (рисунок 6) решающее значение имеет количество пролётов сооружения (продолжительность кинематического воздействия на вагоны поезда). При числе пролётов одной длины более 10, колебания вагонов при движении по сооружению становятся установившимися и нарастания амплитуд не происходит.

а)



б)

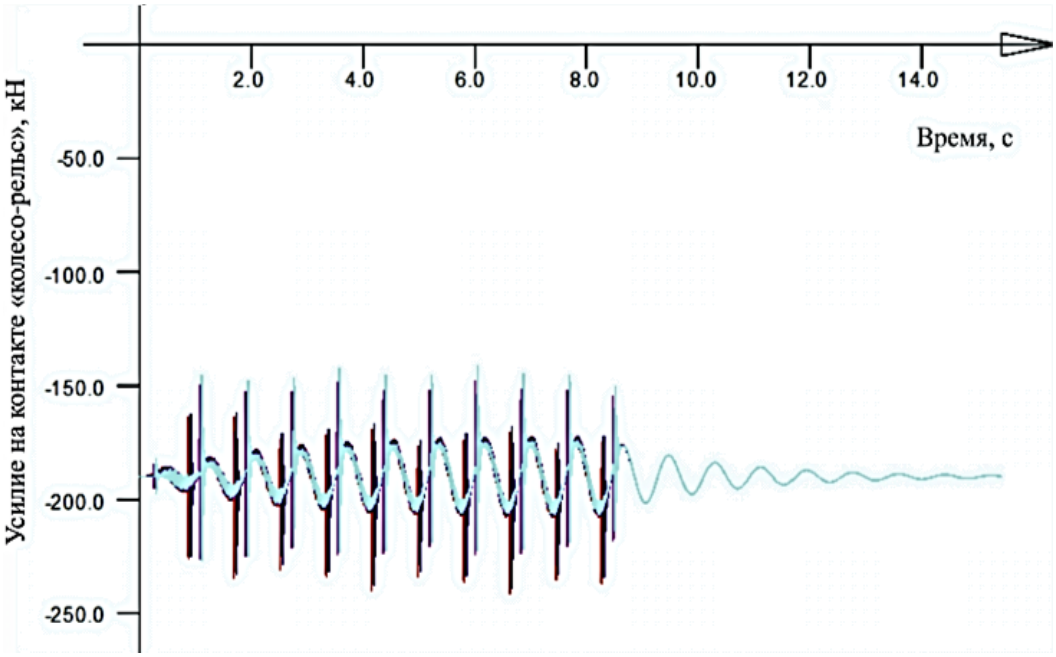


Рисунок 6 – График зависимости усилия на контакте «колесо-рельс» (а) и вертикальных ускорений (б) в кузове первого вагона при движении поезда со скоростью 350 км/ч по цепочке из 10-ти пролётных строений в резонансном режиме

Определяющее значение для динамики подвижного состава имеет траектория, по которой происходит движение колёс, которая определяется линией упругих прогибов пролётных строений. При величине пролёта более двукратной длины вагона, линия упругих прогибов пролётных строений практически не изменяется во времени. Для меньших длин при резонансных режимах колебаний, траектория движения колёс меняется согласно пульсациям прогибов пролётных строений. Это обстоятельство приводит к кратковременному локальному обезгруживанию колёс на контакте с рельсом.

В рамках верификации было выполнено сравнение результатов расчётов, выполненных автором, с данными, представленными в работах авторитетных зарубежных исследователей, а также с имеющимися опытными данными. Анализ сравнения подтвердил достоверность принятых расчётных предпосылок и возможность их широкого использования в практике динамических расчётов мостовых сооружений при воздействии высокоскоростного подвижного состава. Отмечено, что моделирование пролётных строений стержневыми конечными элементами оправдано, что доказывается совпадением с результатами других исследований, полученных с использованием более сложных моделей.

В пятой главе выполнен анализ полученных результатов и приведены основные рекомендации по проектированию разрезных балочных пролётных строений. Определены допустимые величины относительного вертикального прогиба от нормативной временной нагрузки для пролетных строений при различных скоростных режимах движения поездов (рисунок 7). В отличие от аналогичных требований Европейских норм график не ограничен величиной пролёта в 120 м. Это позволяет сделать оценку по критерию комфортности проезда пассажиров для сооружений с большими пролётами без выполнения трудоёмких динамических расчётов взаимодействия подвижного состава и пролётных строений. Предложенные автором ограничения описывают не только основной, но и кратные резонансные режимы колебания вагонов на сооружении.

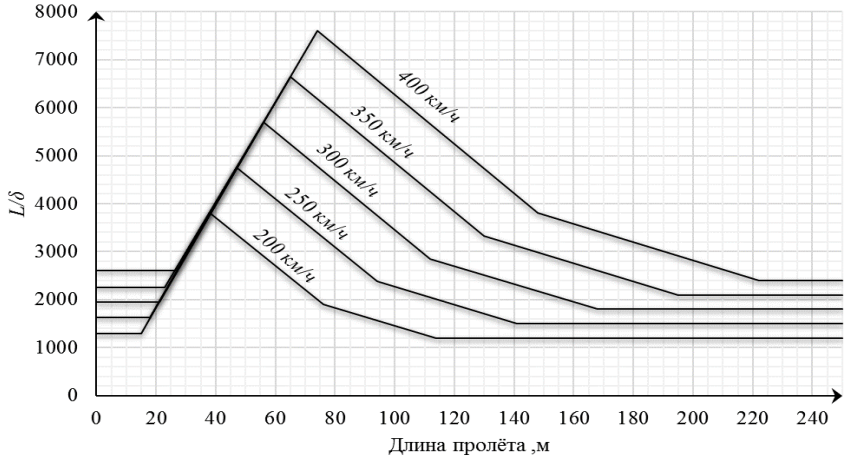


Рисунок 7 – Ограничение вертикальных прогибов пролётных строений из условия обеспечения максимальных ускорений в вагонах 1,0 м/с^2 при движении поездов с различными скоростями: L (м) – расчётная длина пролетного строения; δ (м) – вертикальный прогиб пролетного строения от нормативной временной нагрузки С8

Полученные зависимости построены для случая прохождения поезда по сооружению с 10-ю и более пролётами одинаковой длины, что является наиболее неблагоприятным случаем при возбуждении резонансных колебаний вагонов. Приведённые зависимости привязаны к нормативной временной нагрузке СК (К=8), принятой для ВСМ в России, а не к Европейской нагрузке LM71.

При разработке инженерной методики динамического расчёта разрезных балочных пролётных строений функция возбуждения колебаний пролётного строения, обусловленная движущимися осевыми нагрузками, с помощью разложения в ряд Фурье была представлена в следующем виде:

$$P(t) = \frac{2}{X_n} \int S_0(\lambda) \left(\cos \frac{2\pi Vt}{\lambda} + \sin \frac{2\pi Vt}{\lambda} \right) d\lambda \quad , \tag{1}$$

где λ – длина волны возбуждения, м;
V – скорость движения поезда, м/с;
X_n – расстояние между первой и последней осью (длина поезда), м.

Динамическая характеристика поезда $S_0(\lambda)$ при этом может быть представлена как:

$$S_0(\lambda) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} P_i \cos \frac{2\pi x_i}{\lambda} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} P_i \sin \frac{2\pi x_i}{\lambda} \right)^2} \quad , \tag{2}$$

P_i – нагрузка на *i-ую* ось поезда, кН;
x_i – абсцисса *i-ой* оси поезда (расстояние между нагрузкой P_i и первой осью), м.

Пользуясь вычисленными параметрами, была получена величина динамического отклика конструкции при движении поезда со скоростью V. Эта методика может быть использована только для режима вертикальных колебаний по первой изгибной форме.

Максимальные вертикальные ускорения в середине пролета a_{max} предлагается определять, как произведение следующих слагаемых:

$$a_{\max} = C \cdot A(L/\lambda) \cdot G(\lambda) \quad , \tag{3}$$

где C - параметр, зависящий от массы пролётного строения:

$$C = \frac{4}{m\pi} \quad , \tag{4}$$

$A\ (L\ /\ \lambda)$ зависит только от длины пролёта L и является динамической линией влияния, определяемой следующим образом:

$$A(L/\lambda) = \left| \frac{\cos \frac{\pi L}{\lambda}}{\left(\frac{2L}{\lambda} \right)^2 - 1} \right| \tag{5}$$

$G\ (\lambda)$ зависит от так называемой динамической характеристики поезда и коэффициента затухания (ξ) пролётного строения. Этот параметр обуславливает спектр воздействия поезда, выраженный в кН/м.

$$G(\lambda) = Max \left[\frac{1}{\xi X_i} S_{0,i}(\lambda) \left(1 - \exp\left(-2\pi\xi \frac{X_i}{\lambda} \right) \right) \right] \quad , \tag{6}$$

где X_i – длина части поезда, включающая *i*-ое количество осей.

Использование моделей высокоскоростных поездов А1-А10, рекомендуемых российскими и европейскими нормативными документами, оправдано в случаях, когда на момент проектирования искусственных сооружений не определён тип высокоскоростного подвижного состава. Так, значения огибающей, построенной по максимальным значениям спектральных характеристик моделей поездов А1-А10 для всего диапазона длины возбуждения (λ), превышают соответствующие значения для реальных отечественных и зарубежных высокоскоростных поездов (рисунок 8). Из этого следует вывод, что для выполнения динамических расчётов достаточно использовать только модели поездов А1-А10.

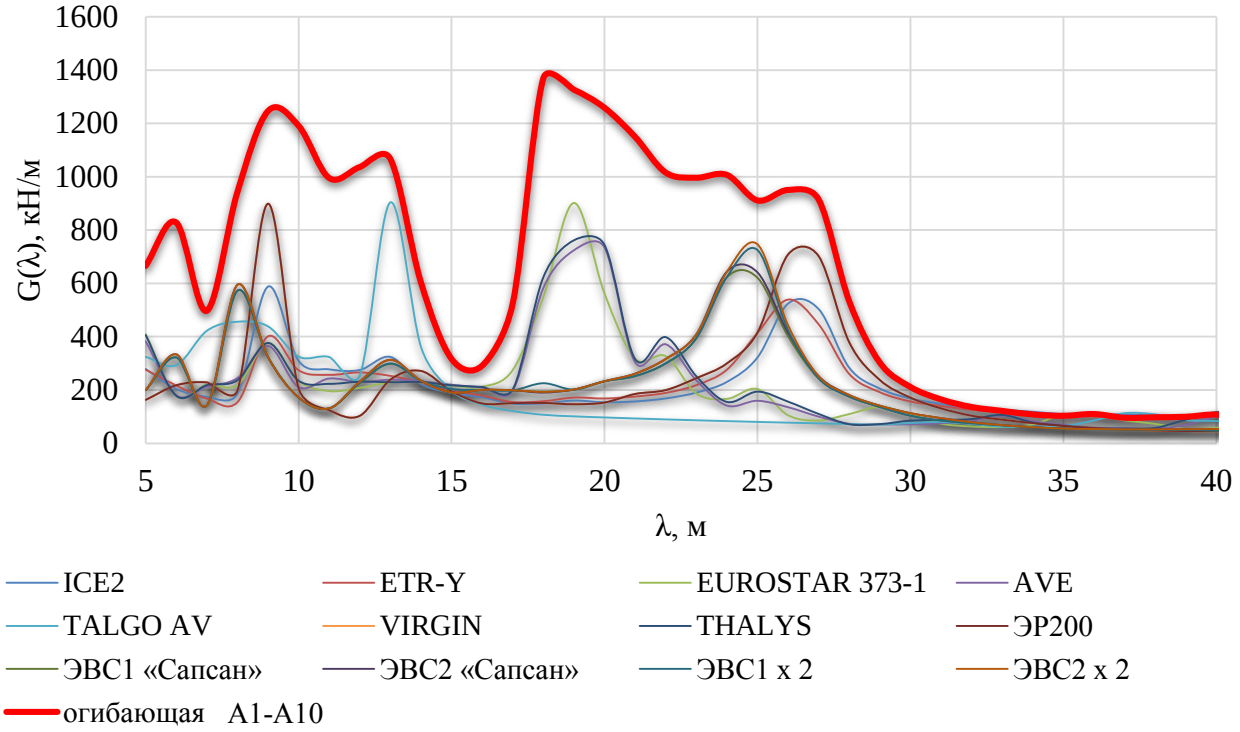


Рисунок 8 – Сравнение спектральных характеристик реальных высокоскоростных поездов и огибающей для моделей поездов А1-А10

Частоты динамического воздействия реальных высокоскоростных поездов имеют большой разброс значений. Таким образом, проектирование искусственных сооружений на все существующие поезда является не рациональным и затрудняет оптимизацию материалоёмкости конструкции. В задании на проектирование необходимо определить основные характеристики поезда, предполагаемого для эксплуатации. Принцип универсальности высокоскоростной линии идёт в разрез с экономическими соображениями, что должно учитываться при обосновании инвестиций строительства ВСМ.

Автором представлены рекомендации по назначению минимально допустимой массы пролётных строений различных пролётов. Учёт данных рекомендаций существенно сокращает трудозатраты на проектирование и снижает вероятность возможных корректировок после выполнения динамических расчётов. Устройство мостового полотна на плитах БМП позволяет проектировать пролётные строения с меньшим расходом материалов (снижение веса до 42%) по сравнению с конструкциями с ездой на балласте.

Автором предложены ограничения нижнего предела собственных частот колебаний разрезных балочных пролётных строений (рисунок 9). Рекомендации Международного союза железных дорог (UIC), приведённые в Еврокоде, разработаны для скоростей поездов не более 250 км/ч. Ограничения, предложенные автором, позволяют на начальной стадии проектирования назначить основные параметры конструкции и минимизировать динамическое воздействие подвижной нагрузки при скоростях движения поездов до 400 км/ч.

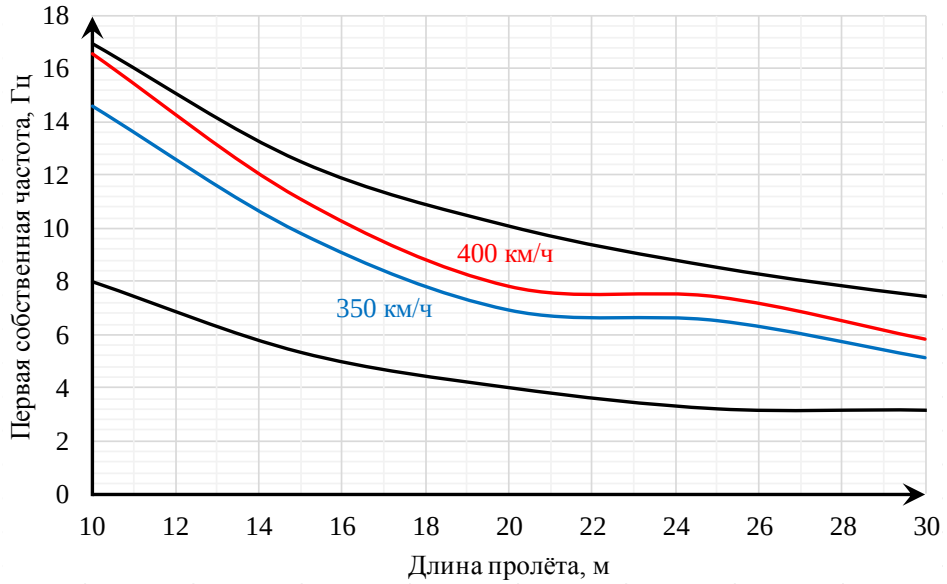


Рисунок 9 – Ограничения нижнего предела собственных частот колебаний разрезных балочных пролётных строений для скоростей движения поездов 350 и 400 км/ч

Увеличение динамического воздействия нагрузки от подвижного состава обусловлено появлением значительных сил инерции, которые и определяют величину динамического коэффициента. Доказано, что их интенсивность может быть аппроксимирована, как полуволна синусоиды (рисунок 10).

Отмечено, что динамические добавки для компонентов напряжённо-деформированного состояния различны.

Динамический коэффициент при расчёте по деформациям предлагается определять:

$$1+\mu_1 = 1+0,788\frac{m\cdot a_{\max}}{v_{0.5}} \tag{7}$$

При расчёте по изгибающему моменту:

$$1+\mu_1 = 1+0,811\frac{m\cdot a_{\max}}{v_{0.5}} \tag{8}$$

При расчёте по поперечной силе:

$$1+\mu_1 = 1+0,637\frac{m\cdot a_{\max}}{v_{0}} \tag{9}$$

где a_{max} – расчётные максимальные вертикальные ускорения пролётного строения при его резонансных колебаниях пролётного строения;

m – погонная масса пролётного строения с учётом веса мостового полотна, т/м;

$v_{0,5}$ и v_0 – эквивалентная равномерно распределённая нагрузка от высокоскоростных поездов (т/м), при $\alpha = s/L$=0,5 и 0,0 соответственно.

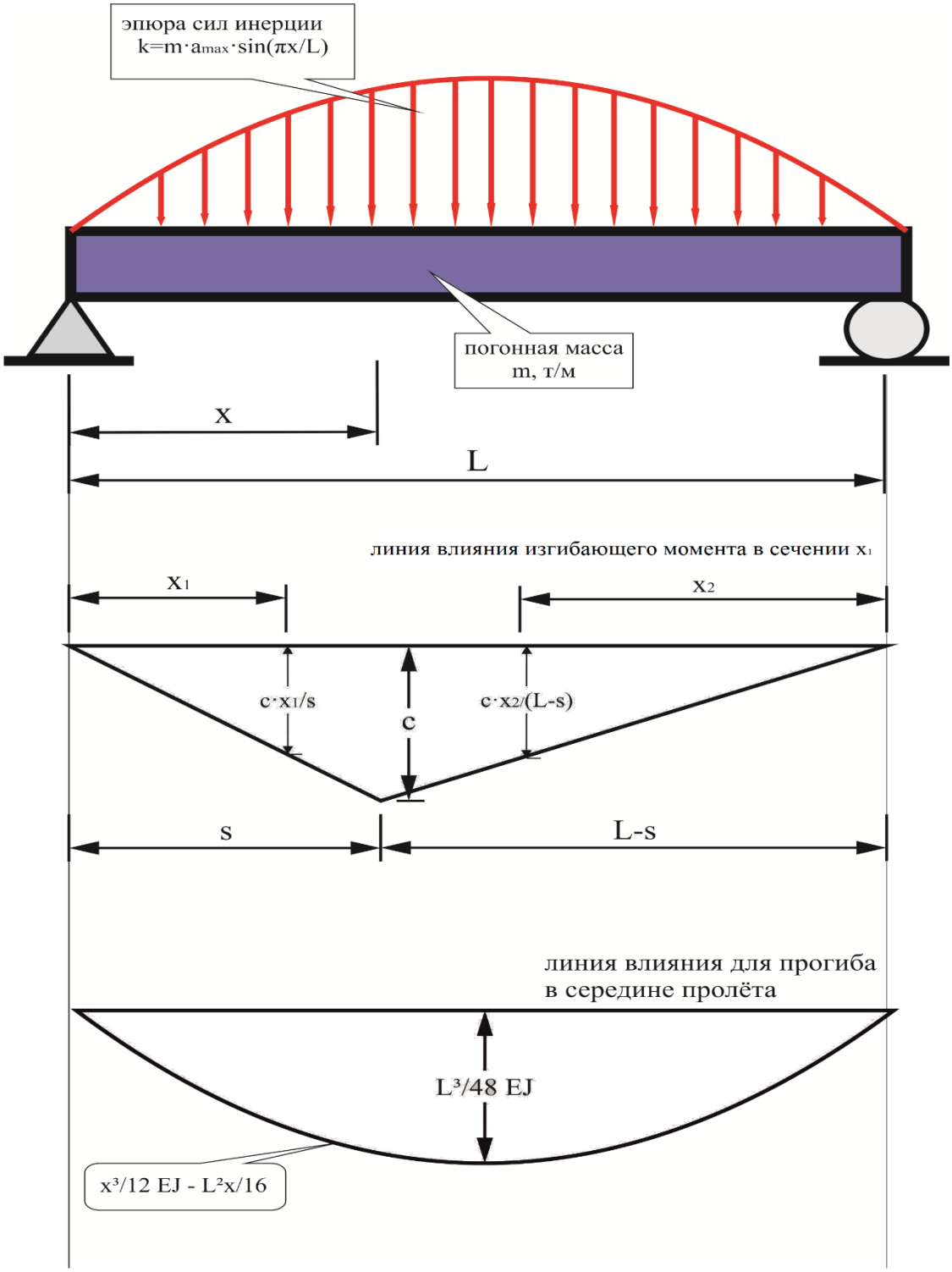


Рисунок 10 – Схема загружения пролётного строения инерционной нагрузкой. Линии влияния основных факторов напряжённо-деформированного состояния пролётного строения

Приведённые зависимости обуславливают необходимость дифференцированного подхода к определению динамических коэффициентов при выполнении расчётных проверок по I и II группе предельных состояний для различных компонентов напряжённо-деформированного состояния (изгибающие моменты, поперечная сила и вертикальные прогибы).

Предложенная автором инженерная методика (рисунок 11) позволяет выполнить динамический расчёт и определить основные усилия в разрезных балочных пролётных строениях без использования численного моделирования, что значительно снижает трудозатраты при проектировании.

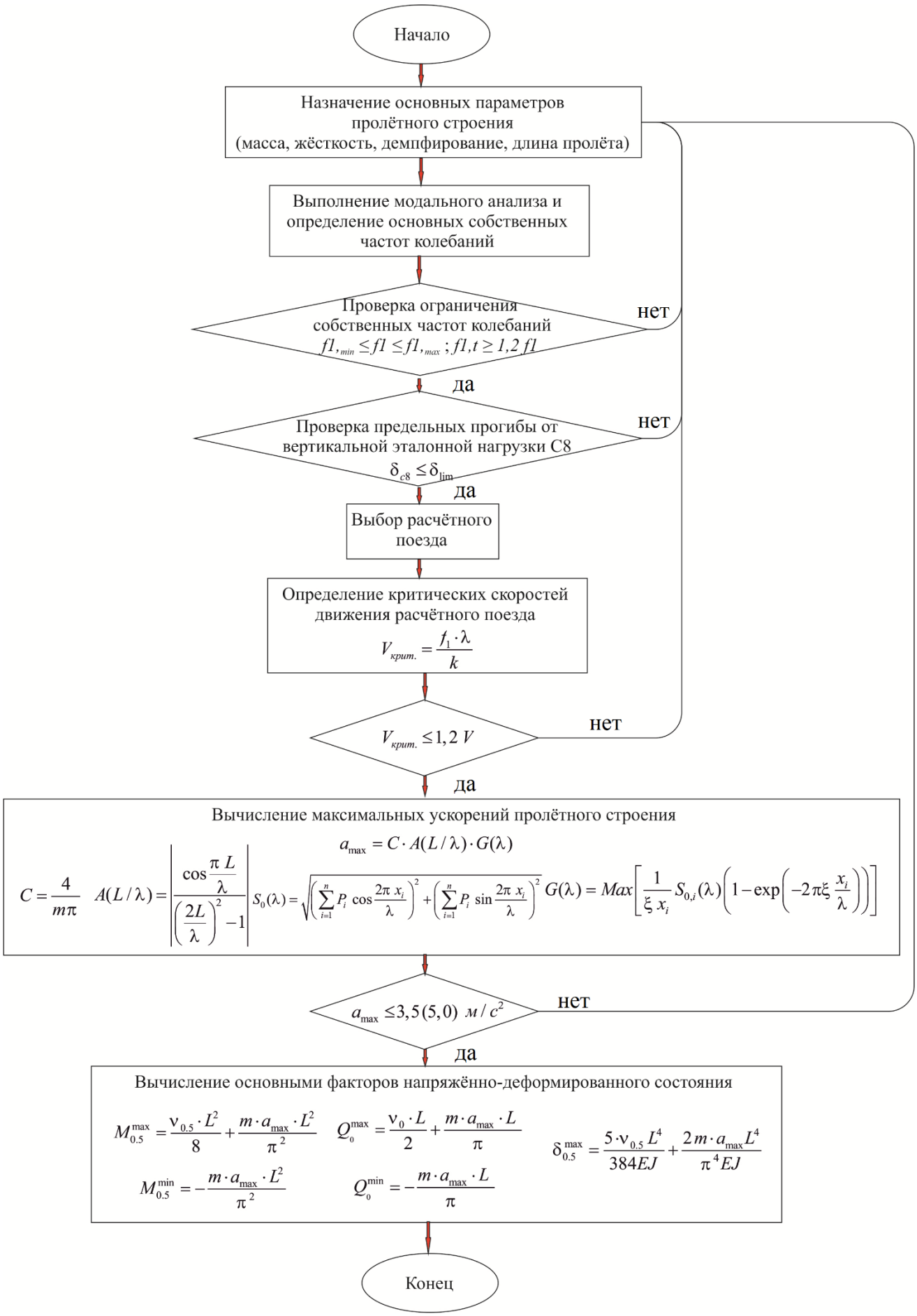


Рисунок 11 – Блок-схема инженерной методики определения экстремальных значений основных факторов напряжённо-деформированного состояния разрезного балочного пролётного строения при динамическом воздействии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Использованные в диссертации математические модели и методики численных расчётов позволили выполнить анализ динамических эффектов и особенностей взаимодействия пролётных строений мостовых сооружений и подвижного состава при скоростях движения до 400 км/ч. В ходе работы определены зависимостей влияния параметров разрезных балочных пролётных строений мостов на характер и величину их динамического отклика. Разработана инженерная методика динамического расчёта разрезных пролётных строений и даны практические рекомендации по рациональному назначению основных параметров конструкции (вертикальная жёсткость, масса, диапазон собственных частот колебаний).

2. При увеличении скоростей движения поездов до 400 км/ч возможно проявление резонансных режимов колебаний пролётных строений. В отдельных случаях коэффициенты динамики могут достигать значения 6 и более. Высокий уровень колебаний нарушает стабильность балластной призмы, что приводит к риску схода поезда с рельсов. Критерием обеспечения стабильности мостового полотна служит величина максимальных ускорений пролётного строения на уровне проезжей части.

3. При обосновании инвестиций строительства ВСМ должны быть определены основные параметры подвижного состава. Использование при расчётах ограниченного числа моделей поездов, позволяет существенно снизить материалоёмкость конструкций (в некоторых случаях снижение веса до 50 %), что обуславливает существенный экономический эффект при строительстве всей магистрали.

4. Колебания подвижного состава определяются траекторией движения колёс, которая характеризуется линией упругих прогибов пролётных строений. При величине пролёта более двукратной длины вагона, траектория движения колёс практически не изменяется во времени. Резонансные колебания вагонов наблюдаются при движении по многопролётным сооружениям с длиной пролётов более 70 м. Для меньших длин пролётов возможны резонансные режимы колебаний пролётных строений. При этом траектория движения колёс меняется согласно пульсациям прогибов пролётных строений, что может приводить к кратковременному локальному обезгруживанию колёс на контакте с рельсом. Для обеспечения безопасности движения высокоскоростных поездов по мостам следует проектировать пролётные строения таким образом, чтобы исключить или минимизировать эффекты, связанные с их резонансными колебаниями.

5. Для выполнения проверок по критерию комфортности проезда пассажиров, необходимо учитывать предложенные в диссертации требования по ограничению допустимой величины относительного вертикального прогиба от нормативной временной нагрузки для скоростных режимов поездов до 400 км/ч. Для сооружений с числом пролётов менее 10, допускается использовать систему понижающих коэффициентов, учитывающих количество последовательных однотипных пролётных строений.

6. На начальной стадии проектирования рекомендуется назначать основные параметры конструкции в соответствии с ограничениями нижнего предела собственных частот колебаний разрезных балочных пролётных строений для скоростей поездов до 400 км/ч. Предложенные ограничения позволяют на начальной стадии проектирования назначить основные параметры конструкции и минимизировать динамическое воздействие подвижной нагрузки при скоростях движения поездов до 400 км/ч.

7. При определении основных конструктивных параметров пролётных строений необходимо учитывать рекомендации по назначению минимальной массы пролётных строений различных пролётов. Учёт предложенных зависимостей существенно сокращает трудозатраты на проектирование и снижает вероятность возможных корректировок после выполнения динамических расчётов. Исходя из критерия по обеспечению стабильности верхнего строения пути на сооружении, устройство мостового полотна на плитах БМП позволяет проектировать пролётные строения мостов на ВСМ с меньшим расходом материалов (снижение веса до 42%) по сравнению с конструкциями с ездой на балласте.

8. При проектировании мостов на ВСМ рекомендуется использовать инженерную методику определения основных факторов напряжённо-деформированного состояния разрезных балочных пролётных строений. Динамические добавки для компонентов напряжённо-деформированного состояния (изгибающие моменты, поперечная сила и вертикальные прогибы) различны. Приведённые зависимости обуславливают необходимость дифференцированного подхода к определению динамических коэффициентов при выполнении расчётных проверок по I и II группе предельных состояний для различных компонентов напряжённо-деформированного состояния (изгибающие моменты, поперечная сила и вертикальные прогибы).

9. Разработанные модели и методики были внедрены и использованы автором при выполнении работ по разработке нормативных документов и научному сопровождению проектирования искусственных сооружений высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва - Казань – Екатеринбург» (ВСМ 2)».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в ведущих научных рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. *Бенин А. В.* Особенности проектирования и строительства мостов высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва-Казань» / А. В. Бенин, Л. К. Дьяченко, В. Н. Смирнов // Известия Петербургского университета путей сообщения – ФГБОУ ВПО ПГУПС. - 2015. - № 4 (45). - С. 15-20 (0,31/0,1 п.л.).

2. *Чижов С. В.* Оценка безопасности мостов с учётом динамического фактора надёжности / С. В. Чижов, Э. Т. Яхшиев, Л. К. Дьяченко // Известия Петербургского университета путей сообщения. - 2016. - № 2 (47). - С. 247-254 (0,43/0,14 п.л.).

3. *Дьяченко Л. К.* Оценка уровня вибраций с точки зрения их воздействия на пассажиров поездов при движении по мостовым сооружениям на высокоскоростных железнодорожных магистралях / Л. К. Дьяченко, В. Н. Смирнов, Е. П. Дудкин // Известия Петербургского университета путей сообщения. - 2017. - № 1. - С. 33-42 (0,56/0,18 п.л.).

4. *Белый А. А.* Проектирование и организация системы мониторинга мостовых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях / А. А. Белый, А. А. Барановский, Д. Е. Воробьев, К. Ю. Долинский, Л. К. Дьяченко, Г. В. Осадчий // Известия Петербургского университета путей сообщения. - 2017. - № 2. - С. 211-222 (0,68/0,11 п.л.).

Публикации в других изданиях:

1. *Дьяченко Л. К.* Анализ динамических характеристик пролетного строения на высокоскоростной железнодорожной магистрали: тезисы / Л. К. Дьяченко; науч. рук. В. В. Кондратов // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: Неделя науки - 2012: материалы LXXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (72; 12-27 апреля 2012 г.; Санкт-Петербург) / ПГУПС. - СПб: ПГУПС, 2012. - С. 83-86 (0,18/0,09 п.л.).

2. *Дьяченко Л. К.* Динамические расчеты пролетных строений мостов ВСМ при движении пассажирских поездов со скоростью до 400 км/ч / Л. К. Дьяченко // Новые технологии в мостостроении (от прошлого к будущему) Сборник трудов Международной научно-технической конференции 2015 года. – ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015 – с.91-97 (0,37 п.л.).

3. *Смирнов В. Н.* Резонансные колебания пролетных строений мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Н. Смирнов, Л. К. Дьяченко, Е. А. Евстигнеев // Новые технологии в мостостроении (от прошлого к будущему) Сборник трудов Международной научно-технической конференции 2015 года. – ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015 – с.67-74 (0,43/0,14 п.л.).

4. *Смирнов В. Н.* Мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Н. Смирнов, А. А. Барановский, Г. И. Богданов, Д. Е. Воробьев, Л. К. Дьяченко, В. В. Кондратов – монография, ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – 274 с (17,12/2,85 п.л.).

5. *Дьяченко Л. К.* Нормирование динамического коэффициента при расчёте мостов на высокоскоростных магистралях / Л. К. Дьяченко // Новые технологии в мостостроении. Сборник трудов Международной научно-технической конференции 2016 года. – ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016 – с.65-73 (0,5 п.л.).

Публикации в зарубежных изданиях:

6. Dyachenko L. An assessment of the dynamic interaction of the rolling stock and the long-span bridges on high-speed railways / L. Dyachenko, A. Benin // MATEC Web of Conferences T. 107 – 2017 (DOI: 10.1051/matecconf/ 201710700014), (0,43/0,21 п.л.) - *входит в международную базу данных SCOPUS.*

7. Dyachenko L. Regulation of the dynamic live load factor for calculation of bridge structures on high speed railway mainlines / L. Dyachenko, A. Benin //Civil and environmental engineering. Vol. 13, Issue 1 – 2017.

8. *Яхшиев Э. Т.* Нормирование динамического коэффициента при расчёте мостов на высокоскоростных магистралях в условиях Республики Узбекистан / Э. Т. Яхшиев, Л. К. Дьяченко // Вестник ТашИИТ №2/3 – 2016– с.43-55.

ДЬЯЧЕНКО Леонид Константинович

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАЗРЕЗНЫХ БАЛОЧНЫХ ПРОЛЁТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЯХ

Специальность 05.23.11 — Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано к печати	26.10.2017	Печ. л. 1,5
Печать-ризография	Бумага для множит. апп.	Формат 60*84 1/16
Тираж 100 экз.	Заказ № 852.	

СР ПГУПС, 190031, С.-Петербург, Московский пр. 9