

На правах рукописи



**СУКОННИКОВА ТАТЬЯНА ВЛАДИМИРОВНА**

**СПЕЦИАЛЬНАЯ СЕЙСМОЗАЩИТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ  
МОСТОВ**

05.23.11 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов,  
аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» на кафедре «Теоретическая механика».

Научный руководитель

**Уздин Александр Михайлович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

**Поляков Владимир Юрьевич**  
доктор технических наук, профессор  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II», кафедра «Мосты и тоннели», профессор

**Смирнова Любовь Николаевна**  
кандидат технических наук  
АО "Научно-исследовательский центр  
"Строительство", ученый секретарь

Ведущая организация:

АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева»

Защита состоится «28» сентября 2017 г. в 14:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.183.02 на базе открытого акционерного общества «Научно-исследовательский институт транспортного строительства» и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» (МГУПС (МИИТ)) по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д 9, стр. 9, ауд. 7618.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МГУПС (МИИТ) на сайте [www.mii.ru](http://www.mii.ru).

Автореферат разослан «14» августа 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук

Зайцев Андрей Александрович

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Сейсмоизоляция в настоящее время является одним из основных средств обеспечения сейсмостойкости мостов, особенно при сейсмичности 8 и более баллов. При этом между пролетным строением и опорой устанавливаются податливые, или скользящие, сейсмоизолирующие опорные части. Для этих целей обычно используются резиновые или сферические опорные части, которые обеспечивают значительные взаимные смещения между пролетным строением и опорой. Несмотря на то, что указанное решение хорошо известно и используется практически во всех странах, его применение до сих пор ограничивается автодорожными мостами. Это связано с тем, что большие взаимные смещения пролетного строения и опоры приводят к расстройству верхнего строения пути на мосту и могут быть причиной разрыва рельсовых плетей при эксплуатационных нагрузках, вызванных торможением, центробежной силой и поперечными ударами подвижного состава. В практике проектирования известны единичные случаи применения сейсмоизоляции на железнодорожных мостах: при этом сейсмоизолирующие опорные части блокируются специальными элементами и не работают при эксплуатационных нагрузках, однако такие решения повышают сейсмостойкость мостов только при действии редких сильных землетрясений и требуют усиления опор на действие проектных землетрясений. В настоящее время проводятся серьезные исследования по применению сейсмоизоляции на железнодорожном транспорте, прежде всего в Италии и Японии, однако эти результаты не привели пока к решению задачи сейсмоизоляции железнодорожных мостов.

В России также отсутствуют проекты сейсмоизолированных железнодорожных мостов. Это обусловлено тем, что российские нормы содержат ограничения на смещения пролетного строения относительно опоры. Нормы<sup>1</sup> требуют, чтобы величина взаимного смещения  $u$  не превышала значения  $0.5\sqrt{L}$ , где

$L$  – длина меньшего примыкающего к опоре пролетного строения, м (но не менее 25 м);

$u$  – взаимное смещение, см.

При таком жестком ограничении период колебаний моста не должен превосходить величину порядка 1.1-1.3 с, а парциальный период существующих опорных устройств составляет 2-4 с.

Обеспечение сейсмоизоляции железнодорожного моста приводит к весьма существенной экономии при строительстве опор. В районах сейсмичностью 8 и более баллов стоимость опор может быть снижена на 40-50%, однако на первый взгляд задача сейсмоизоляции железнодорожного моста кажется неразрешимой.

---

<sup>1</sup> СП 35.13330.2011, п. 5.47

Сказанное определяет актуальность и сложность поставленных в работе исследований.

**Степень разработанности проблемы.** При наличии значительного числа работ вопросы сейсмоизоляции железнодорожных мостов до настоящего времени не изучены, и сейсмоизоляция применяется лишь в единичных случаях. Это связано с тем, что большие взаимные смещения пролетного строения и опоры приводят к расстройству верхнего строения пути на мосту и могут быть причиной разрыва рельсовых плетей при эксплуатационных нагрузках, вызванных торможением, центробежной силой и поперечными ударами подвижного состава. На момент написания диссертации в мировой практике отсутствовал анализ работы верхнего строения пути как при эксплуатационных нагрузках, так и при действии проектного и максимального расчетного землетрясений (ПЗ и МРЗ соответственно). В своей работе автор провел такой анализ при наличии устройств сейсмоизоляции, чем обосновал возможность и условия применения подобной сейсмической защиты. Кроме того, на основании полученных теоретических результатов было предложено и запатентовано практическое решение сейсмоизоляции железнодорожных мостов, успешно реализованное на нескольких российских объектах.

Теоретическими основами работы стали труды российских и зарубежных ученых в области сейсмостойкого строительства: Абакарова А.Д., Айзенберга Я.М., Аптикеева Ф.Ф., Аубакирова А.Т., Белаш Т.А., Гольденבלата И.И., Долгой А.А., Ильичева В.А., Карцивадзе Г.Н., Килимника Л.Ш., Корчинского И.Л., Костарева В.В., Кузнецовой И.О., Курбацкого Е.Н., Напетваридзе Ш.Г., Николаенко Н.А., Рутмана Ю.Л., Савинова О.А., Ставницера Л.Р., Уздина А.М., Шульмана С.А., Дж. Барра, М. Био, А. Мариони, Ф. Омори, М. Фардиси, П. Хубера и др.

#### **Цели диссертационной работы:**

1. Обоснование возможности применения сейсмоизоляции для железнодорожных мостов;
2. Разработка технических решений, обеспечивающих как сейсмоизоляцию моста, так и нормальную эксплуатацию верхнего строения пути.

В соответствии с поставленными целями в диссертационной работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Оценка работы верхнего строения пути сейсмоизолированного железнодорожного моста при горизонтальных нагрузках от торможения и поперечных ударов подвижного состава;
2. Оценка работы верхнего строения пути на мосту при проектном (ПЗ) и максимальном расчетном (МРЗ) землетрясениях;
3. Разработка общих требований к системам сейсмоизоляции железнодорожных мостов;
4. Разработка технического решения сейсмоизоляции моста, обеспечивающего как непосредственно саму сейсмоизоляцию моста, так и нормальную эксплуатацию верхнего строения пути.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем:

1. Впервые проанализирована работа верхнего строения пути сейсмоизолированного моста на продольную нагрузку от воздействия температуры и торможения подвижного состава; при этом показана возможность смягчения нормативного требования на ограничение перемещений пролетного строения примерно в два раза;
2. Впервые проанализирована работа верхнего строения пути на мосту на поперечные нагрузки от ударов подвижного состава и на этой основе сделаны рекомендации по устройству сейсмоизолирующих опорных частей.
3. Впервые проанализировано поведение верхнего строения пути на мосту при действии ПЗ и МРЗ;
4. Предложено новое техническое решение опирания пролетных строений железнодорожного моста, обеспечивающего нормальную эксплуатацию верхнего строения пути.

**Теоретическая значимость** диссертационной работы заключается в обосновании возможности смягчения нормативного требования по взаимному смещению пролетного строения относительно опоры, а значит, и применения самой сейсмоизоляции на железнодорожных мостах.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в том, что результаты теоретических исследований автора доведены до практических предложений и реализации при возведении более ста опор железнодорожных мостов на Олимпийских объектах г. Сочи, при строительстве нескольких эстакад на железнодорожной линии Адлер-Сочи, железнодорожного моста через р. Мзымту в районе г. Сочи, моста через р. Или в Казахстане.

По предлагаемому техническому решению получен патент №2550777.

**Методология и метод исследования.** Реализация поставленных в диссертационной работе задач предусматривала:

1. Математическое моделирование работы рельсовых плетей на мосту с сейсмоизоляцией при статических и динамических нагрузках;
2. Выбор расчетных воздействий и математическое моделирование сейсмических колебаний моста при землетрясениях различной силы;
3. Анализ существующих технических решений сейсмозащиты мостов и разработка нового технического решения, обеспечивающего требования к сейсмоизоляции железнодорожных мостов.

Результаты математического моделирования были сопоставлены с данными других исследований и опытом прошлых землетрясений.

Расчеты проведены с использованием следующих апробированных программных комплексов:

1. Программный комплекс COSMOS для расчета температурных напряжений в рельсе;
2. Программа Structure CAD (SCAD) для расчета напряжений в рельсе от поперечных ударов подвижного состава;

3. Программный комплекс «ДРАКОН», разработанный к.т.н. И.О. Кузнецовой и к.т.н. А.А. Долгой для расчета сейсмоизолированного моста на действие ПЗ и МРЗ;

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика и результаты расчета напряженно-деформированного состояния рельсовых плетей железнодорожных мостов при продольной нагрузке от температуры и торможения подвижного состава;
2. Методика и результаты расчета напряженно-деформированного состояния рельсовых плетей при поперечной нагрузке от поперечных ударов подвижного состава;
3. Методика задания расчетных акселерограмм и результаты динамического расчета мостов на действие проектного и максимального расчетного землетрясений;
4. Рекомендации по устройству систем сейсмоизоляции железнодорожных мостов;
5. Новое техническое решение сейсмоизоляции железнодорожных мостов.

**Степень достоверности результатов исследований** обеспечивается использованием известных научных методов строительной механики и апробированных программных комплексов. Результаты исследований подтверждаются их соответствием данным других специалистов, полученным по отдельным вопросам, рассмотренным в диссертации. Обоснованность предлагаемых технических решений подтверждается их широким внедрением на железнодорожных линиях в районе г. Сочи.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационных исследований доложены и обсуждены:

1. На научных конференциях и семинарах (Санкт-Петербург, ПГУПС, 2010-2012 г);
2. На VI Савиновских чтениях (Санкт-Петербург, 2010 г).
3. На XV Всемирной конференции по сейсмостойкому строительству (Лиссабон, 2012);
4. На VII Савиновских чтениях (Санкт-Петербург, 2014), где автор занял первое место на конкурсе молодых ученых.

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 – в научных изданиях, рецензируемых ВАК.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (152 наименования, из них 40 – на иностранном языке). Работа содержит 155 страниц текста, включающего в себя 70 рисунков и 5 таблиц.

## 2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной автором темы, сформулированы цели и поставлены задачи исследования, обозначена научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, представлены методология и методы исследования, общая характеристика работы и положения, которые автор выносит на защиту.

**В главе 1** дан анализ состояния исследуемого вопроса. При этом отмечается вклад в разработку проблемы отечественных и зарубежных специалистов: Абакарова А.Д., Айзенберга Я.М., Аптикеева Ф.Ф., Аубакирова А.Т., Белаш Т.А., Гольденבלата И.И., Долгой А.А., Ильичева В.А., Карцивадзе Г.Н., Килимника Л.Ш., Корчинского И.Л., Костарева В.В., Кузнецовой И.О., Курбацкого Е.Н., Напетваридзе Ш.Г., Николаенко Н.А., Рутмана Ю.Л., Савинова О.А., Ставницера Л.Р., Уздина А.М., Шульмана С.А., Дж. Барра, М. Био, А. Мариони, Ф. Омори, М. Фардиси, П. Хубера и др.

При наличии значительного числа работ вопросы сейсмоизоляции железнодорожных мостов до настоящего времени не изучены, и сейсмоизоляция применяется лишь в единичных случаях. Это связано с тем, что отсутствует анализ работы верхнего строения пути как при эксплуатационных нагрузках, так и при действии ПЗ и МРЗ.

**Глава 2** посвящена работе сейсмоизолированных мостов при эксплуатационных нагрузках: продольных (от температуры, торможения поезда) и поперечных (от ударов подвижного состава). При этом рассмотрены три расчетные схемы моста:

1. С традиционным расположением опорных частей (подвижная и неподвижная);
2. С заменой в традиционной схеме неподвижной опорной части на податливую;
3. Со всеми податливыми опорными частями.

Для расчета усилий в рельсе от *тормозных нагрузок* в работе использована методика и программное обеспечение, разработанные к.т.н. И.О. Кузнецовой. При этом мост рассматривался как единая рамная система, в которой пролетное строение связано с опорами упругими или фрикционными связями.

Для оценки *температурных нагрузок* продольного направления в рельсовых плетях в работе рассмотрена расчетная схема плети, представленная на рис. 1, и разработана методика расчета напряжений в плети с учетом фрикционного взаимодействия рельса и подрельсового основания. Податливость элементов сейсмоизоляции учитывалась при определении жесткости пружин  $C_i$ , моделирующих подрельсовое основание.

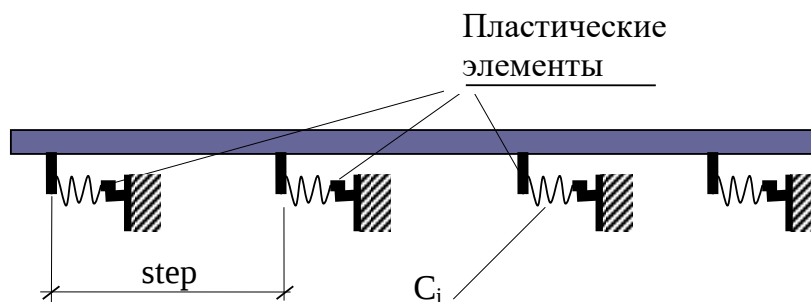


Рисунок 1 - Расчетная схема для оценки температурных напряжений в рельсовой плети

Расчет проводился с использованием программного комплекса COSMOS и вспомогательных программ, разработанных на каф. «Теоретическая механика» и «Мосты» ПГУПС, позволяющих учесть расчетный перепад температур, тип и скорость движения поезда, данные о числе опор и наличии данных об этих опорах, данные о верхнем строении пути, пролетном строении, опорных частях, опорах и их конструктивной схеме.

Результатами расчета с использованием упомянутых программных средств являются эпюры усилий, перемещений и напряжений, возникающих в рельсе бесстыкового пути на мосту, с учетом проскальзывания рельса и учета участков открепления железнодорожного пути по длине сооружения.

Задаваясь различными значениями податливостей опорных частей при прочих постоянных условиях (анализировалось железнодорожное неразрезное пролетное строение 3х33 м) были получены результаты в следующем виде:

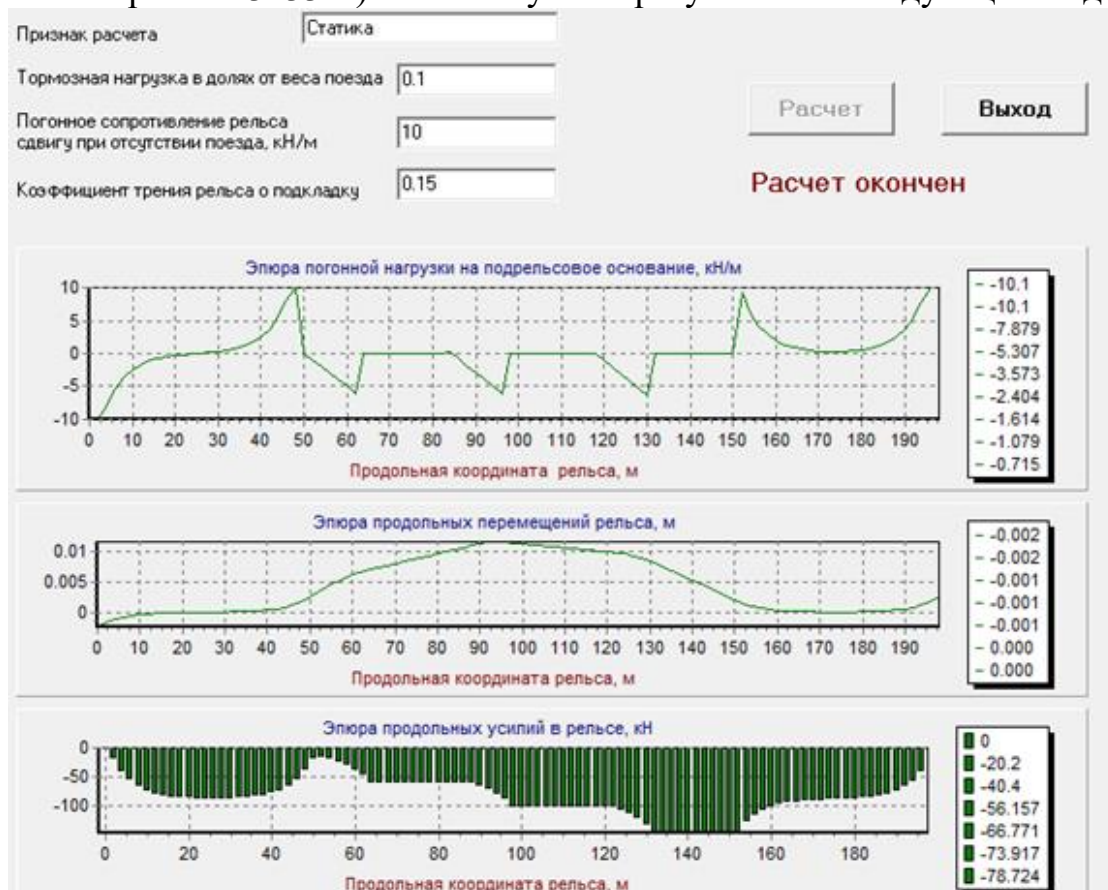


Рисунок 2 - Графические результаты расчета

В расчетах принимались податливости, соответствующие перемещениям пролетного строения:  $u = 0,5\sqrt{L}$ ,  $u = \sqrt{L}$ ,  $u = 2\sqrt{L}$  и т.д.

Исследования показали, что с увеличением податливости опоры (увеличением перемещения пролетного строения  $u$ ) усилия и перемещения в рельсе снижаются (рис.3 и рис.4).

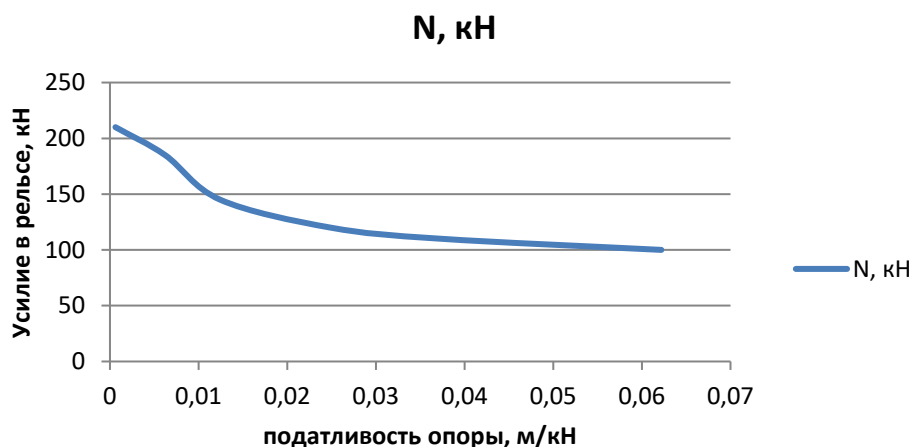


Рисунок 3 - Зависимость усилий в рельсе от податливости опоры

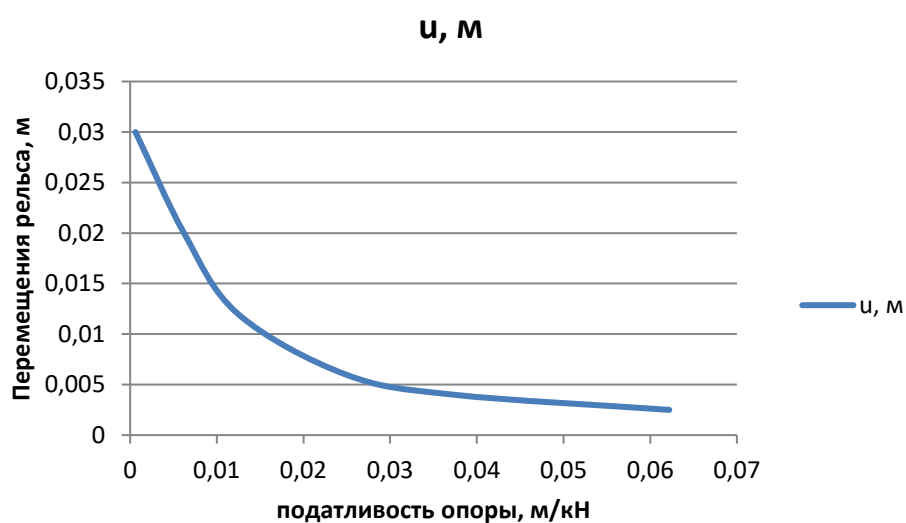


Рисунок 4 - Зависимость усилий в рельсе от податливости опоры

Максимальное напряжение в рельсе составляет 25,4 МПа (254 кгс/см<sup>2</sup>). Таким образом, можно сделать вывод, что увеличение податливости опоры хоть и ведет к увеличению перемещений пролетного строения больше допусковых по СП35.13330.2011, но на НДС рельса оказывает незначительное влияние и не ухудшает эксплуатационных характеристик рельсового пути.

Для оценки напряжений в рельсе от *поперечных ударов подвижного состава* использована пространственная расчетная схема моста, в которую рельсовая плетель включена как элемент расчетной схемы. Расчеты выполнены с использованием программного комплекса SCAD.

Упругие характеристики для шпал приняты как для бруса прямоугольного деревянного сечения размером 180 на 250 мм. Балласт моделировался упругими элементами с жесткостью  $1000/2 = 500$  т/м для балластной призмы и  $7500/2 = 3750$  т/м в случае использования БМП Пролетное строение принято абсолютно жестким. Предполагается установка двух опорных частей под пролетное строение на каждой опоре.

Модуль сдвига резины принят согласно СП 35.13330.2011 “Мосты и трубы” как для марки НО-68-1 при температуре -20С и выше равным  $90 \text{ т/м}^2$ , соответственно жесткость РОЧ на сдвиг принята равной  $100 \text{ т/м}$ .

Парциальный период колебаний пролетного строения на сейсмоизолирующих опорных частях составляет 1.21 с.

Горизонтальная поперечная нагрузка от ударов подвижного состава принята равной  $0,6K$  или  $0,84 \text{ т/м}$ .

Результаты расчета сведены в таблицу 1.

Таблица 1

#### Максимальные напряжения в головке рельса Р65

| Схема установки ОЧ, жесткость балласта | Макс. смещения, мм | Макс. момент в рельсе, т·м | Макс. перерезывающая сила в рельсе, т | Напряжения в головке рельса кгс/см <sup>2</sup> |
|----------------------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------|
| №1, 7500 т                             | 0,061              | 0,02                       | 0,2                                   | 27                                              |
| №1, 1000т                              | 0,426              | 0,05                       | 0,24                                  | 67                                              |
| №2, 7500 т                             | 70                 | 1,73                       | 6                                     | 2300                                            |
| №2, 1000 т                             | 70                 | 1,48                       | 4                                     | 1970                                            |
| №3, 7500 т                             | 70                 | 1,59                       | 6                                     | 2120                                            |
| №3, 1000т                              | 70                 | 1,34                       | 5                                     | 1790                                            |

При отсутствии сейсмоизоляции напряжения в рельсах от ударов подвижного состава пренебрежимо малы. Расчеты на воздействие ударов подвижного состава показывают, что более-менее приемлемой можно считать сейсмоизоляцию с использованием системы из одной податливой и одной подвижной групп опорных частей под пролетное строение, при этом предпочтительнее, чтобы железнодорожный путь был уложен на балласте.

Выполненные исследования подтвердили, что наличие железнодорожного пути ограничивает возможности применения обычной сейсмоизоляции для железнодорожных мостов. Наряду с этим в работе показано, что нормативное ограничение гибкости опор может быть смягчено и допустимые смещения пролетного строения относительно опоры можно оценивать по формуле:

$$u_{\max} < a \cdot \sqrt{L} \quad (1)$$

где  $a=0.01$  м (по СП 35.13330.2011  $a=0.005$ ), а  $u_{\max}$  и  $L$  задаются в метрах.

Однако даже при рекомендованном допустимом смещении опоры относительно пролетного строения прогнозировать применение обычной

сейсмоизоляции можно лишь на мостах с пролетом  $L < 66$  м при использовании термоупрочненных рельсов.

**В главе 3** рассмотрена работа моста при действии землетрясений различной силы, проанализированы существующие методы задания сейсмического воздействия.

В настоящее время нет универсальных рекомендаций по заданию сейсмического воздействия. В имеющихся исследованиях для проведения расчетов используются следующие способы задания расчетных акселерограмм:

- 1) использование акселерограмм прошлых землетрясений;
- 2) генерирование ансамбля узкополосных процессов;
- 3) генерирование расчетной акселерограммы по заданному спектру;
- 4) универсальный короткий временной процесс для всех сооружений (модели Костарева, Аубакирова, Эпштейна и др.);
- 5) акселерограмма, сгенерированная для рассматриваемого сооружения.

Использование акселерограмм прошлых землетрясений позволяет учесть реальные особенности сейсмического воздействия. Однако многие записи оказываются неуравновешенными и при интегрировании дают многометровые расчетные смещения, что делает их непригодными для кинематических расчетов систем сейсмоизоляции. Кроме того, даже в достаточно представительных пакетах, как правило, отсутствуют записи землетрясений, опасных для проектируемого сооружения.

При использовании набора узкополосных процессов оперируют ансамблем случайных воздействий с резко выраженным пиком на спектре ускорений. Из всего пакета для сооружения является опасным тот процесс, в котором преобладающая частота является резонансной для сооружения; остальные акселерограммы пакета безопасны для сооружения и расчет на них не информативен.

Генерирование одной акселерограммы по заданному спектру можно рассматривать как один из видов задания единственной акселерограммы для площадки строительства. Такой подход обоснованно критикуется инженерами. Во-первых, это связано с тем, что из 27 сильных землетрясений, имевших место на территории бывшего СССР, 24 произошли в районах, считавшихся несейсмичными или слабосейсмичными. Во-вторых, в инженерной практике необходимую сейсмологическую информацию далеко не всегда удается получить. В-третьих, сооружения могут быть весьма чувствительными к небольшим изменениям в спектре реакции. Иногда, изменение преобладающего периода воздействия на 5%, что вполне возможно в рамках сейсмологических исследований, приводит к изменению нагрузок в 1.5-2 раза. Особенно чувствительны к этим ошибкам металлические конструкции.

В-четвертых, генерация воздействия для площадки строительства совершенно непригодна для типового проектирования, когда сооружение должно быть сейсмостойким на любых площадках.

Широкополосные процессы предлагаются различными авторами в качестве универсальных, поскольку любое сооружение находит в процессе

резонансную частоту, при этом энергия процесса оказывается распределенной между многими частотами, что делает процесс менее опасным.

Акселерограмма, генерируемая для сооружения, исходит из энергетических характеристик землетрясения и принимается в виде суперпозиции затухающих синусоид, резонансных для рассматриваемого сооружения. При этом получают консервативные оценки усилий и смещений конструкции.

В диссертационной работе выполнены расчеты с использованием всех указанных способов моделирования воздействия. При этом установлено, что генерация акселерограмм для площадки строительства и подбор записей прошлых землетрясений под площадку строительства дают неконсервативные оценки сейсмостойкости сооружения, и их использование должно опираться на надежные прогнозы сейсмологов, которые часто отсутствуют.

Синтетические акселерограммы оказались более опасными для расчета моста, поскольку в них энергия концентрируется на частотах, резонансных для сооружения.

В работе развит подход генерации воздействия с линейно меняющейся частотой колебаний, предложенный Г. Джонсоном и Х. Эпштейном и откорректированный в работах А.М. Уздина и Г. Аннаева. При этом автором предложены зависимости шага цифровки<sup>2</sup> процесса и его уровня от частоты основного тона колебаний сооружений и ситуационной сейсмичности на площадке строительства.

В процессе исследований автором получены оценки преобладающих периодов от шага цифровки, которые представлены на рис. 2.



Рисунок 2 - Зависимость рассматриваемого процесса от шага цифровки

Следует отметить, что из рассмотренных процессов наиболее опасным для сооружения оказался процесс Уздина-Аннаева. Его можно использовать для предварительного расчета сооружения. Такой результат связан с тем, что процесс не учитывает ряд особенностей сейсмического воздействия, в частности, соотношения между пиковыми ускорениями, смещениями и скоростями. Результаты расчета моста с расчетным пролетом 33 м при данном процессе приведены на рис. 3-6. Более точный результат можно получить,

<sup>2</sup> Обычно запись является аналоговым сигналом (картинкой). Для расчета ее цифруют с заданным шагом. Расстояние по времени между точками цифровки называется шагом цифровки.

используя Рекомендации НТЦ СС<sup>3</sup>, однако генерация воздействия по этим рекомендациям оказывается более сложной.

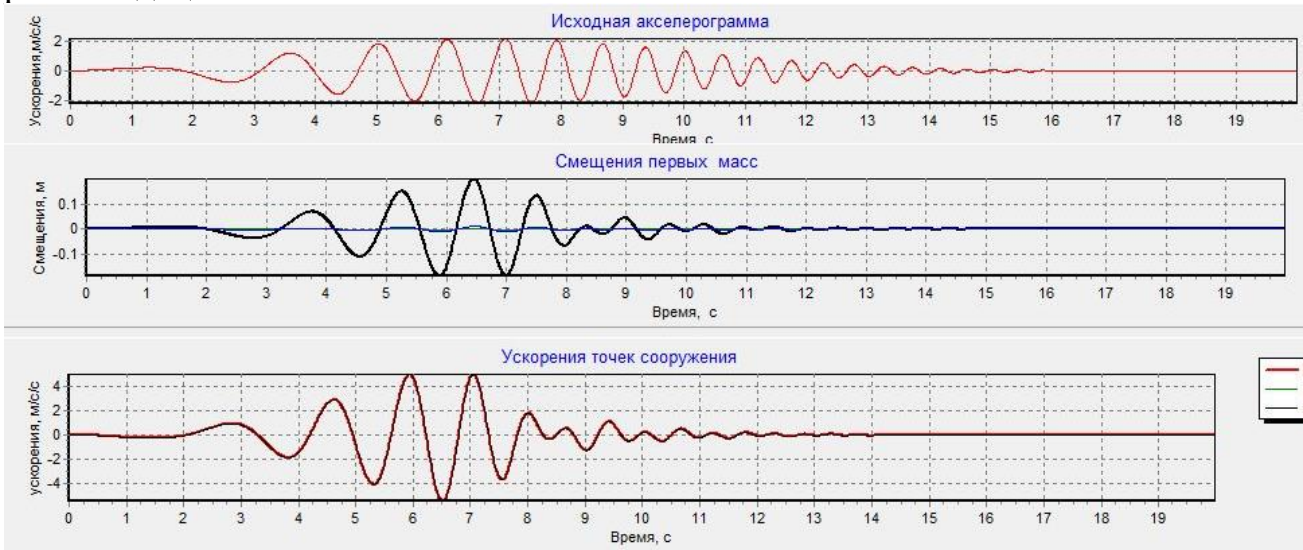


Рисунок 3 - Результаты расчета моста на действие МРЗ с объединенной сейсмоизоляцией для ситуационной сейсмичности 8,9,10. Показаны смещения пролетных строений и опор, ускорения пролетных строений

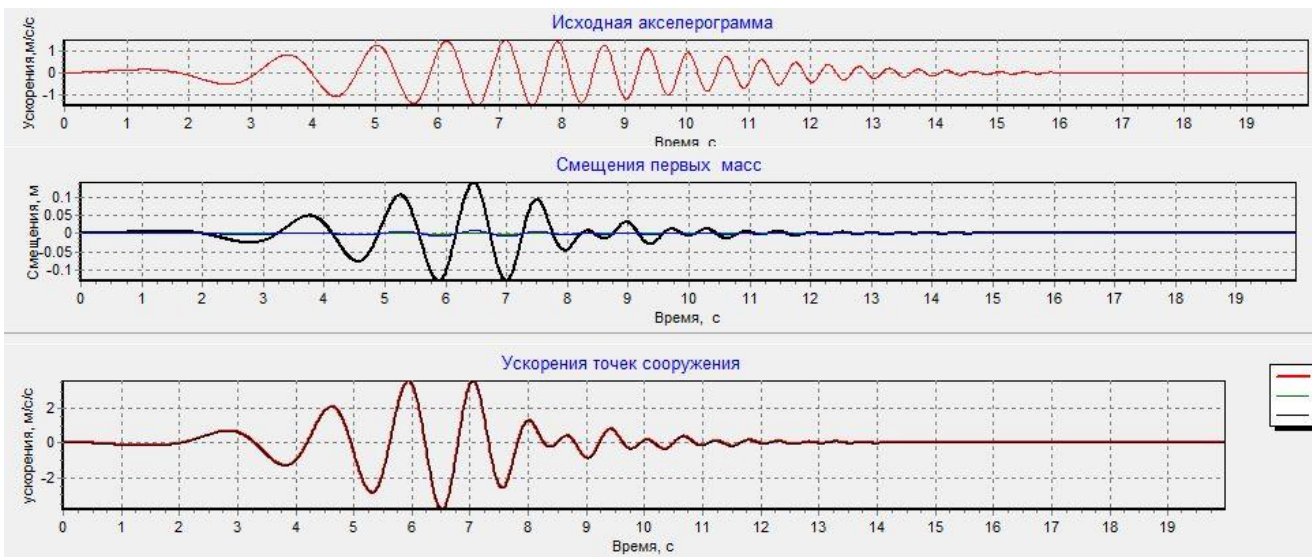


Рисунок 4 - Результаты расчета моста на действие ПЗ с объединенной сейсмоизоляцией для ситуационной сейсмичности 8,9,10. Показаны смещения пролетных строений и опор, ускорения пролетных строений

<sup>3</sup> Научно-производственная организация «Научно-технический центр по сейсмостойкому строительству и инженерной защите от стихийных бедствий» (Петропавловск-Камчатский)

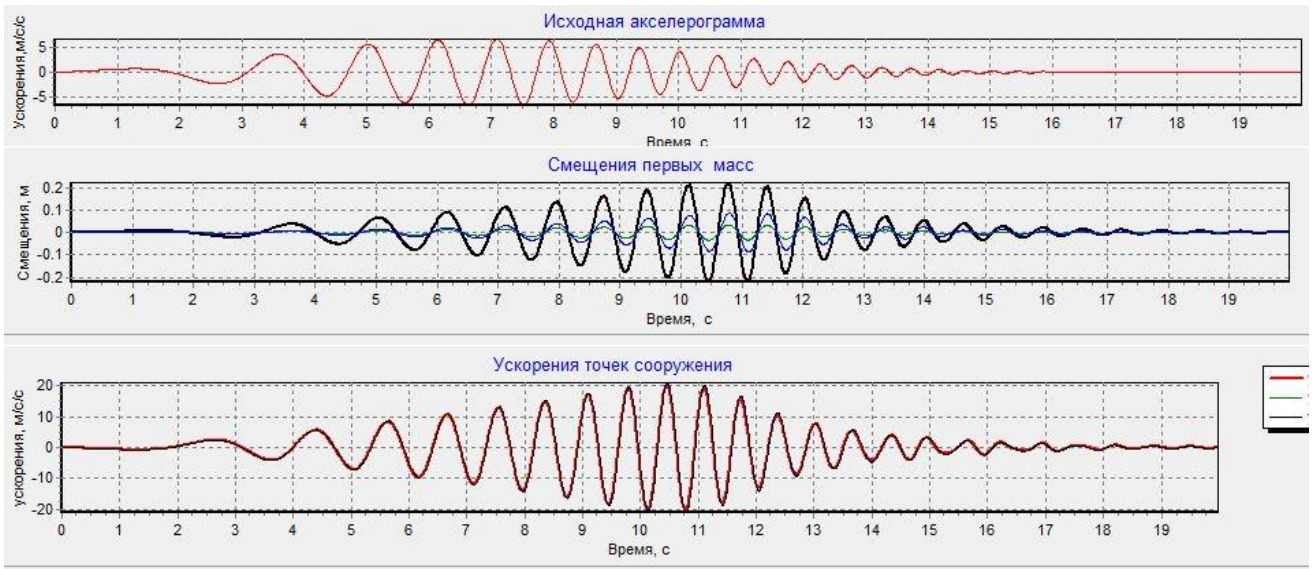


Рисунок 5 - Результаты расчета моста на действие МРЗ с традиционной системой сейсмоизоляции (одна податливая, одна подвижная опорная часть) для ситуационной сейсмичности 8,9,10. Показаны смещения пролетных строений и опор, ускорения пролетных строений

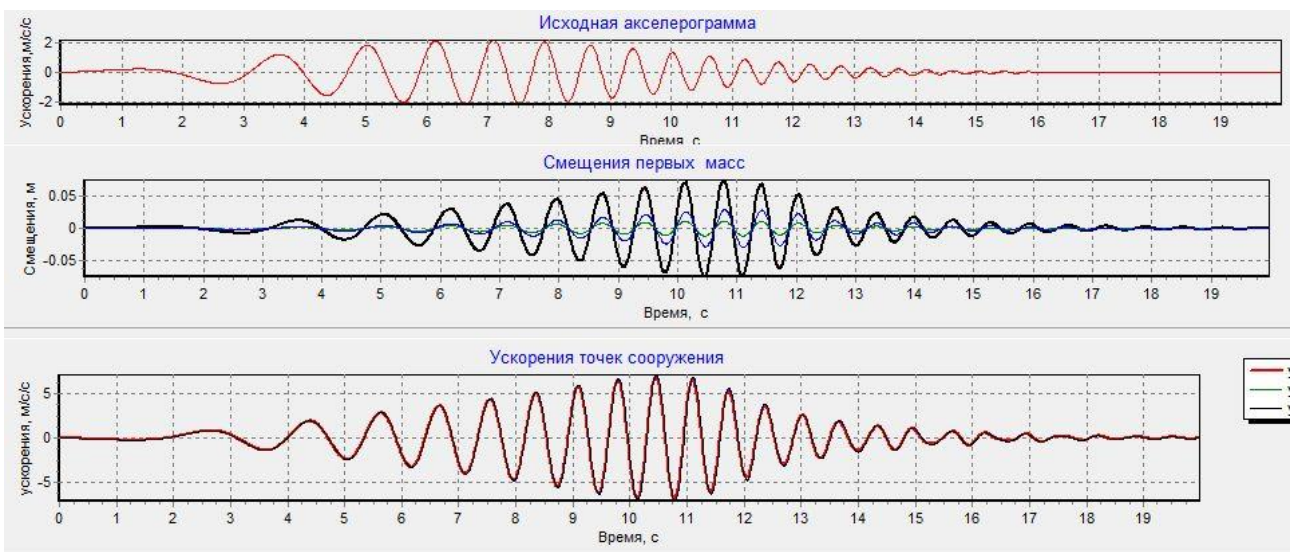


Рисунок 6 - Результаты расчета моста на действие ПЗ с традиционной системой сейсмоизоляции (одна податливая, одна подвижная опорная часть) для ситуационной сейсмичности 8,9,10. Показаны смещения пролетных строений и опор, ускорения пролетных строений

Расчеты показывают, что использование сейсмоизоляции при ограничении смещений величиной  $U_{\text{lim}} = \sqrt{L}$  ( $U_{\text{lim}}$  в см, а  $L$  в м) обеспечивает снижение сейсмических нагрузок при действии ПЗ и не вызывает опасных напряжений в рельсе при длине моста до 200 м.

При МРЗ возникают значительные смещения пролетного строения относительно насыпи подходов, достигающие для мостов длиной 100-150 м

величины 20-30 см. Эти смещения передаются рельсовой плети и затухают на длине 100 - 150 м. При этом усилия в рельсах Р65 на границе моста и подходной насыпи достигают величины 4000 – 4500 кг/см<sup>2</sup>. Это значит, что при использовании термоупрочненных рельсов с расчетным сопротивлением 5800 кг/см<sup>2</sup> не будет происходить их разрыв при МРЗ.

Резюмируя сказанное, можно рекомендовать использование объединяющей сейсмоизоляции для железнодорожных мостов при ограничении ее податливости условием ограничения предельных смещений величиной  $U_{lim}=\sqrt{L}$ . При этом следует использовать термоупрочненные рельсы Р65. Для мостов длиной до 100 м обеспечивается сохранность рельсового пути на мосту и подходах. Для мостов большей длины необходим расчет целостности и устойчивости рельсовых плетей при ПЗ. При МРЗ следует предусматривать при проектировании возможность разрыва рельсовой плети.

В главе 4 сформулированы общие требования сейсмозащиты железнодорожных мостов, предложено техническое решение по обеспечению нормальной эксплуатации железнодорожного пути наряду с сейсмозащитой моста при ПЗ и МРЗ, приведены примеры его реализации.

Сформулированные выше принципы реализованы при проектировании и строительстве железнодорожных мостов на олимпийских объектах г.Сочи. Для обеспечения сейсмостойкости в проектах принята трехуровневая система сейсмозащиты. При этом конструкция принята неравнопрочной: система опирания пролетного строения на опору имеет меньшую несущую способность, чем тело опоры и фундамент. В результате сейсмического воздействия предусматриваются прогнозируемые повреждения опорных частей и верхнего строения пути, а опора моста сохраняет несущую способность.

Три уровня системы сейсмозащиты, принятые в проектах, проиллюстрированы на рис.7,8. Первый уровень включает гибкий столик, воспринимающий горизонтальные нагрузки. Второй и третий уровни включают системы фрикционно-подвижных болтовых соединений, представляющих собой соединение на высокопрочных болтах с овальными отверстиями, допускающими подвижки в соединении при экстремальных нагрузках.

Столики можно выполнять с передачей и без передачи на них вертикальной нагрузки.

На первом уровне защиты работает только гибкий столик, который амортизирует сейсмические толчки и снижает коэффициент динамичности. На втором уровне происходит проскальзывание во фрикционном соединении столика с пролетным строением (рис.8)

Основной элемент второго уровня защиты – болтовое фрикционно-подвижное соединение (ФПС). ФПС отличается от обычного болтового соединения овальными отверстиями под болты и специальным покрытием соединяемых стальных листов, обеспечивающим плавность процесса скольжения.

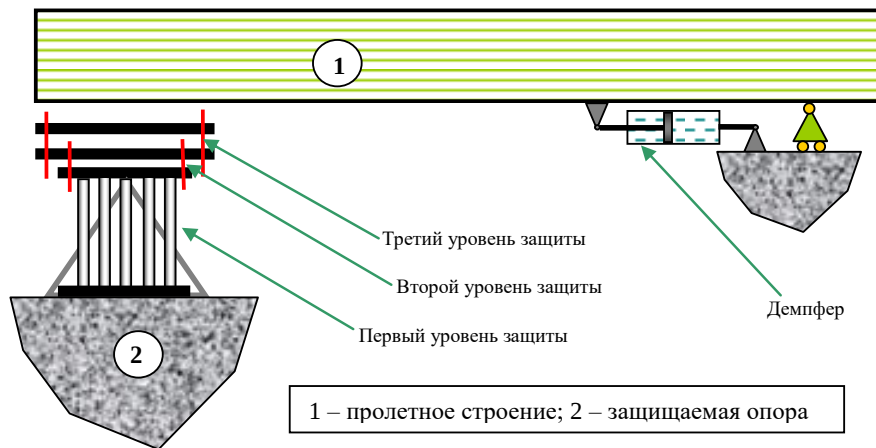


Рисунок 7 - Иллюстрация к уровням защиты опоры

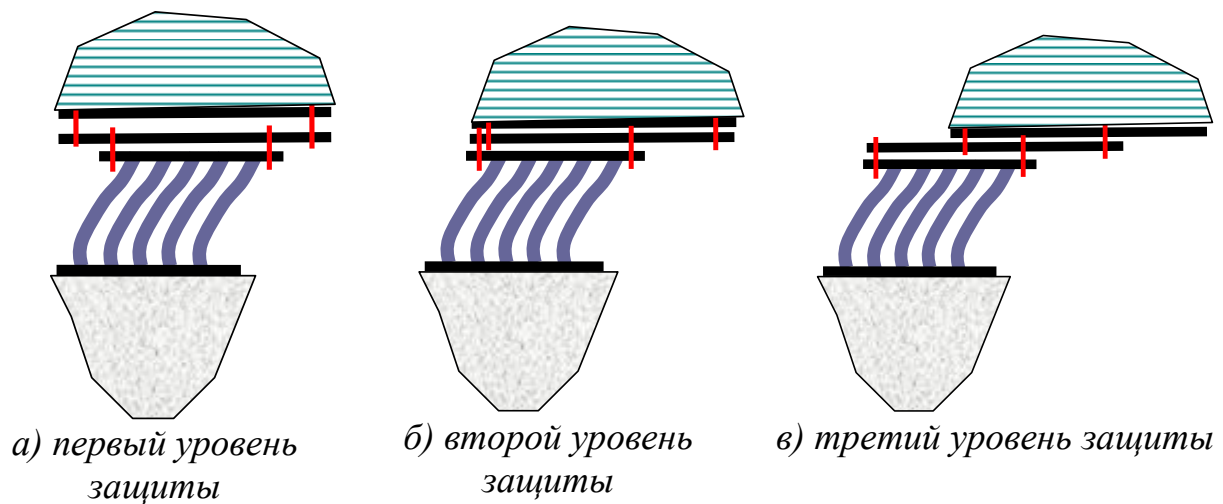


Рисунок 8 - Работа трех уровней сейсмозащиты

Если зазор ФПС второго уровня закрывается, включается защита третьего уровня, представляющая собой ФПС с силой трения, на 30-40% превышающей несущую способность опоры. В этом случае в опоре могут наблюдаться выколы бетона и значительные деформации арматуры, не приводящие, однако, к прогрессивному разрушению тела опоры. Суммарные подвижки ФПС обоих уровней составляют 15-25 см.

Для снижения смещений в ФПС и нагрузок на опору на всех уровнях защиты система снабжается демпферами, которые устанавливаются параллельно с элементами, воспринимающими горизонтальную нагрузку. Демпферы могут устанавливаться как на опоре с упруго-неподвижной опорной частью, так и на опорах с подвижными опорными частями.

Предложенные системы защиты были использованы при строительстве 15 железнодорожных мостов в г. Сочи. Все пролетные строения выполнены неразрезными с передачей горизонтальной нагрузки на одну из опор.

Передача горизонтальной нагрузки осуществлялась через гибкий столик, а вертикальная нагрузка передавалась на подвижную опорную часть.

На рис. 9 показан вид податливой опорной части в виде стержневого амортизатора.



Рисунок 9 - Вид установленной податливой опорной части в виде стержневого амортизатора

**Выводы** диссертационной работы содержат анализ заданных воздействий на сооружение, рекомендации к проведению соответствующих расчетов, полученные результаты и, соответственно, рекомендации по устройству сейсмоизоляции на железнодорожных мостах.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги исследования выражаются в следующем:

1. Анализ исследований в области сейсмоизоляции мостов показывает, что использование сейсмоизолирующих опорных частей является весьма эффективным средством сейсмозащиты мостовых опор; для сейсмичности более 8 баллов такой путь сейсмозащиты можно считать основным. Однако сейсмоизоляция в настоящее время применяется для сейсмозащиты автодорожных мостов. Наличие железнодорожного пути на мостах ограничивает возможности применения на нем систем сейсмоизоляции, поскольку приводит к большим взаимным смещениям пролетных строений относительно опор и друг друга. Это, в свою очередь, должно вести к расстройству пути и перенапряжению рельсов при эксплуатационной нагрузке. Эти вопросы до настоящего времени не были исследованы. Отсутствуют также исследования и по анализу работы пути при проектных (ПЗ) землетрясениях.

2. В Российских нормах податливость опор с опорными частями ограничена величиной  $U_{lim}=0.5\cdot\sqrt{L}$  ( $U_{lim}$  – величина в см, а  $L$  - в метрах), что существенно ограничивает возможности сейсмоизоляции. Расчеты показывают, что использование сейсмоизоляции при ограничении смещений величиной  $U_{lim}=\sqrt{L}$  обеспечивает снижение сейсмических нагрузок при действии ПЗ и не вызывает опасных напряжений в рельсе при длине моста до 200 м.

3. Во всех случаях на сейсмоизолированных мостах предпочтение следует отдавать применению верхнего строения пути с ездой на балласте. При

использовании безбалластного мостового полотна необходимо проводить расчет напряженно-деформированного состояния рельсовых плетей и их проверку на разрыв (зимой) или потерю устойчивости (летом).

4. Для обеспечения прочности рельсовых плетей при эксплуатационной нагрузке парциальный период сейсмоизоляции не должен превышать 1.25 с в обоих направлениях.

5. Расчет сейсмоизолированных мостов, включая оценку напряженно-деформированного состояния рельсов, следует проводить по акселерограммам землетрясений. В настоящее время нет универсальных рекомендаций по их заданию. В имеющихся исследованиях для проведения расчетов используются акселерограммы прошлых землетрясений и различные синтетические акселерограммы. Синтетические акселерограммы оказались более опасными для расчета мостов, поскольку в них энергия концентрируется на частотах, резонансных для сооружения.

6. Важным результатом выполненных расчетов является факт отсутствия проскальзывания рельсовой плети даже при МРЗ на мостах с сейсмоизолирующими опорами. Это означает, что при их расчете всегда можно использовать рамную расчетную схему.

7. При МРЗ возникают значительные смещения пролетного строения относительно насыпи подходов, достигающие для мостов длиной 100-150 м величины 20-30 см. Эти смещения передаются рельсовой плети и затухают на длине 100 - 150 м. При этом усилия в рельсах на границе моста и насыпи достигают величины 4000 – 4500 кгс/см<sup>2</sup>. Это значит, что при использовании термоупрочненных рельсов не будет происходить их разрыва при МРЗ.

8. **Рекомендации** на основе анализа работы верхнего строения пути сейсмоизолированных железнодорожных мостов состоят в использовании для них объединяющей сейсмоизоляции при ограничении ее податливости условием ограничения предельных смещений величиной  $U_{lim} = \sqrt{L}$ . При этом следует использовать термоупрочненные рельсы. Для мостов длиной до 100 м при этом обеспечивается сохранность рельсового пути на мосту и подходах. Для мостов большей длины необходим расчет целостности и устойчивости рельсовых плетей при эксплуатационных нагрузках.

9. Даже при рекомендованном допустимом смещении опоры относительно пролетного строения обычную сейсмоизоляцию можно применять на мостах пролетом  $L < 66$  м. Для мостов пролетами более 33 м при устройстве сейсмоизоляции необходимо выполнять расчет прочности рельсового пути на эксплуатационные нагрузки.

10. Из рассмотренных процессов наиболее опасным для сооружения оказался процесс Уздина-Аннаева, у которого велосиграмма задается в виде затухающей синусоиды переменной частоты. Его можно **рекомендовать** использовать для предварительного расчета сооружения. Такой результат связан с тем, что процесс не учитывает ряд особенностей сейсмического воздействия, в частности, соотношения между пиковыми ускорениями, смещениями и скоростями.

11. **Перспективой исследования** является увеличение длин пролетов сейсмоизолированных железнодорожных мостов. Установка уравнильных приборов позволяет воспринимать значительные продольные перемещения сейсмоизолированных пролетных строений, однако при этом остается открытым вопрос о поперечных нагрузках на рельсовые плети. Для повышения эффективности сейсмоизоляции можно рекомендовать использование более мощных рельсов, например Р-75. Это может позволить использование сейсмоизоляции на мостах пролетами до 88 м.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в научных изданиях, рецензируемых ВАК**

1. **Жгутова<sup>4</sup>, Т.В.** Сейсмозащита моста на олимпийской лыжной трассе в Красной Поляне [Текст] / Кузнецова И.О., Шермухамедов У., Жгутова Т.В., Хайбинь В. // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2010. – №2. – С. 199-207.
2. **Жгутова, Т.В.** К вопросу использования двух пролетных строений для гашения сейсмических колебаний опор мостов [Текст] / Жгутова Т.В., Хайбинь В. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2011. – №2. – С. 64-68.
3. **Жгутова, Т.В.** Оценка работы рельсового пути на мостах с сейсмоизоляцией и требования к сейсмоизоляции с учетом работы пути [Текст] / Жгутова Т.В., Уздин А.М. // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2012. – №3. – С. 217-237.

### **Публикации в других изданиях**

4. **Жгутова, Т.В.** Сейсмоизоляция железнодорожных мостов [Текст] / И.О. Кузнецова, А.М. Уздин, В. Хайбинь, Т.В. Жгутова // Дороги. Инновации в строительстве. – 2010. – №4. – С. 64-68.
5. **Жгутова, Т.В.** Оценка безопасности бесстыкового пути по величине зазора при его разрыве [Текст] / Т.И. Зайцева, Т.В. Жгутова, А.В. Самойлова, А.М. Уздин // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2011. – №4. – С.53-56.
6. **Жгутова, Т.В.** Сейсмозащита железнодорожных мостов в Сочи [Текст] / И.О. Кузнецова, А.М. Уздин, Т.В. Жгутова, В. Хайбинь, С.А. Шульман // Заседания рабочей группы ASSISi «Сейсмоизоляция мостов и крупномасштабное проектирование». – 2011. – С. 119-132.
7. **Жгутова, Т.В.** Оценка безопасности работы рельсовой плети на подходах к сейсмоизолированному мосту [Текст] / Т.В. Жгутова, Т.И. Зайцева // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2013. – №2. – С.32-33.

---

<sup>4</sup> В 2016 г автор диссертации сменила фамилию Жгутова на фамилию Суконникова

8. **Жгутова, Т.В.** Простая модель сейсмического воздействия для динамического расчета сооружений [Текст] / Г. Аннаев, А.Б. Ильясов, Т.В. Жгутова, О.А. Сахаров, А.М. Уздин // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2014. – №1. – С.24-27.

9. **Жгутова, Т.В.** Результаты исследования сейсмоизоляции железнодорожных мостов [Текст] / Т.В. Жгутова // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2014. – №4. – С.19-22.

**Суконникова Татьяна Владимировна**

## **СПЕЦИАЛЬНАЯ СЕЙСМОЗАЩИТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ**

05.23.11 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов,  
аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 28.06.2017 г. Печ.л. – 1,5  
Печать – ризография. Бумага для множит. апп. Формат 60×90 1/16  
Тираж 80 экз. Заказ № \_\_\_\_\_