

На правах рукописи

Для служебного пользования

Экз. № 000004 \*

КРАСКОВСКИЙ  
Василий Евгеньевич

УДК 624.21

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВРЕМЕННЫХ МОСТОВ  
С ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ И ОБОСНОВАНИЕ  
ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ  
ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ**

Специальность 05.23.15 — мосты и транспортные  
тоннели

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из путей повышения темпов строительства и восстановления железнодорожных мостов является применение конструкций из высокопрочных сталей, позволяющих существенно снижать массу конструкций и трудоёмкость их монтажа. Эффективность использования этих сталей для пролётных строений мостов во многом определяется величинами предельных деформаций и, прежде всего, вертикальных упругих прогибов главных балок под нагрузкой. Повышение допустимого уровня напряжений в балках позволяет снизить их металлоёмкость, но вместе с тем влечёт за собой уменьшение вертикальной жёсткости пролётных строений, а следовательно, и возрастание упругих прогибов, которые строго ограничиваются нормами проектирования.

При этом, как показывает опыт проектирования облегчённых пролётных строений из высокопрочных сталей, добиться рационального использования прочности материала в главных балках практически невозможно. Попытки применения таких сталей в опытных образцах пролётных строений для временных и краткосрочных мостов, предпринимавшиеся в 70-80 годах, не дали ожидаемого эффекта в снижении массы конструкций. Объясняется это, в первую очередь, несоответствием вертикальных деформаций, которые могли бы иметь место в случае полного использования прочности сталей, действующим нормам.

Из сложившегося положения возможны два выхода. Первый заключается в поиске новых конструктивных форм, позволяющих повысить жёсткость проектируемых пролётных строений, например, за счёт применения неразрезных или других систем. В этом направлении ведутся опытно-конструкторские работы рядом организаций. Второй

путь - обоснованное снижение действующих норм прогибов при безусловном обеспечении безопасности движения поездов, не требующее значительных затрат. Однако проводившиеся ранее теоретические и экспериментальные исследования не привели к эффективной реализации такого пути из-за недостаточной изученности факторов, определяющих нормирование прогибов облегчённых пролётных строений.

Между тем, более полный анализ этих факторов, с учётом взаимодействия в единой механической системе "временный мост - поезд", даёт возможность выявить резервы для некоторого снижения требований к жёсткости конструкций, рационального использования высоких прочностных свойств сталей и, в конечном итоге, внедрения их в практику строительства. Этим и определяется актуальность дальнейшего изучения вопроса о предельных деформациях пролётных строений временных и краткосрочных мостов. Положительное решение вопроса могло бы придать новый импульс и работам, ведущимся по упомянутому выше первому направлению.

Цель работы - исследование взаимодействия конструкций временных мостов с подвижным составом и выработка рекомендаций по нормированию вертикальных прогибов пролётных строений с учётом применения высокопрочных сталей.

Основные задачи исследования:

- разработка математической модели колебательных процессов во взаимодействующей системе "временный мост - поезд" и теоретическое определение допустимых деформаций пролётных строений;
- проведение комплексного натурного эксперимента на мосту с опытными пролётными строениями облегчённой конструкции и на взаимодействующем с ним подвижном составе;
- оценка результатов математического моделирования и натурных испытаний; разработка предложений по корректировке существующих норм прогибов пролётных строений временных и краткосрочных

мостов.

#### Научная новизна работы:

- разработаны расчётная схема и математическая модель взаимодействия конструкции временного моста с подвижным составом, учитывающие специфику таких мостов (повышенную деформативность пролётных строений, податливость и диссипативные свойства опор);
- впервые рассмотрена работа автосцепки подвижного состава при проходе по временному мосту и учтено условие исключения самопроизвольных расцепов экипажей поезда из-за чрезмерных взаимных смещений головок соседних автосцепок, вызванных упругими деформациями пролётных строений;
- рассмотрены различные состояния демпферов сухого трения в рессорном подвешивании экипажей, в головках автосцепок и учтена возможность переходов демпферов из рабочего (открытого) состояния в заклиненное и наоборот, которые имеют место при реальных эксплуатационных скоростях, а также состоянии пути на мосту, характеризующемся повышенными местными неровностями;
- получены теоретические и экспериментальные величины основных показателей вертикальной динамики подвижного состава, взаимных смещений головок автосцепок экипажей при движении по мосту с гибкими пролётными строениями, позволяющие оценить допустимость тех или иных прогибов для нормальной эксплуатации.

#### Практическое значение:

- разработанные в диссертационной работе рекомендации позволяют более обоснованно нормировать вертикальные прогибы пролётных строений и за счёт уменьшения излишних запасов жёсткости устранить существующие препятствия для широкого внедрения высокопрочных сталей во временных и краткосрочных железнодорожных мостах;
- в результате реализации предложений по нормированию проги-

бов расширяется область применения существующих конструкций, в частности, из выпускаемых промышленностью сварных широкополочных двутавровых балок, а для вновь проектируемых пролетных строений может быть достигнуто снижение металлоёмкости на 15-20 %.

Достоверность полученных теоретических результатов подтверждается достаточной согласованностью с данными проведенного натурного эксперимента на опытном временном мосту с гибкими пролётными строениями, а также на взаимодействующем с ним подвижном составе.

На зачиту выносятся:

- методика разработки расчётной схемы и математическая модель взаимодействия конструкции временного моста с подвижным составом;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований, предложения по нормированию вертикальных прогибов пролётных строений.

Внедрение результатов:

Результаты диссертации внедрены в Технические условия проектирования временных железнодорожных мостов (ТУВЖМ), в разработанном Ленгипротрансместом проекте пролетных строений с пониженной вертикальной жёсткостью (шифр 536 РП), в научно-исследовательской работе ЛВУ ЖДВ и ВОСО, ВНИО ЖДВ (тема ВО-82-22), а также в учебнике "Восстановление искусственных сооружений на железных дорогах" (изд. 1988 г.).

Апробация работы. Основные научные положения и результаты диссертации были доложены и обсуждены на заседании секции сейсмостойкого строительства Ленинградского областного научно-технического общества стройиндустрии (в 1986 г.), в полном объёме диссертационная работа докладывалась (в 1989 г.) на кафедре строитель-

ства искусственных сооружений Ленинградского высшего училища железнодорожных войск и военных сообщений им. М.В.Фрунзе, кафедре мостов Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта им. акад. В.Н.Образцова, кафедре мостов и научно-исследовательской лаборатории динамики мостов Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта им. М.И.Калинина.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы, включающего 121 наименование, и приложений. Диссертация содержит 205 страниц машинописного текста (из них основной текст - 153 с.), 43 рисунка и 21 таблицу.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, указываются цель и задачи проводимых исследований, даётся краткая характеристика работы.

В первой главе представлен обзор научной литературы и выполнен анализ существующих норм вертикальных прогибов металлических пролётных строений.

Вопрос о нормировании их вертикальной жёсткости давно привлекал внимание многих исследователей и имеет более чем вековую историю. Еще в 1873 году, благодаря трудам проф. Белелибского Н.А., впервые в мировой практике было произведено официальное нормирование упругих прогибов пролётных строений. "Допускаемые прогибы" определялись как величины упругих деформаций, соответствующие допускаемым нормальным напряжениям в поясах балок или ферм, т.е. им придавалось значение критериев прочности. Влияние этих деформаций

на движение поезда не учитывалось.

Уже в XX-м веке в трудах В.А.Линка, Л.Ф.Николаи, Г.М.Фаермана, Ю.А.Нилендера, В.К.Качурина, Н.С.Стрелецкого нормирование прогибов пролётных строений в той или иной степени стало связываться с воздействием на подвижной состав, однако при этом использовался главным образом эмпирический метод исследования.

Первое теоретическое обоснование норм прогибов с позиций обеспечения безопасного и плавного движения поездов сделано в 1944 году И.И.Казеем. Исходя из условия "спокойного хода" экипажей, которое обеспечивалось в случае, когда инерционные силы, действующие на подпрессоренные части экипажа, не преодолевали сил трения в рессорном подвешивании, он определил допустимые для эксплуатации прогибы пролётных строений временно восстановленных железнодорожных мостов:  $I/300$  от расчётного пролёта при пролётах от 12 до 25 м и  $I/400 + I/450$  - при меньших пролётах. Рекомендации И.И.Казея позволили решить ряд важных практических задач по восстановлению разрушенных во время войны мостов. Разумеется, в качестве исходных принимались характеристики обрабатывавшегося в то время подвижного состава, существенно отличающегося от современного по конструкции и грузоподъёмности.

Значительное увеличение массы и скорости движения поездов, последовавшее в послевоенные годы, а также появление сталей с повышенными прочностными характеристиками потребовали нового подхода к проблеме нормирования деформаций пролётных строений. В связи с этим были проведены глубокие теоретические и экспериментальные исследования, которые вылились в новое научное направление - взаимодействие конструкций мостов с подвижным составом в единой механической системе. Весомый вклад в становление и развитие этого направления внесли Н.Г.Бондарь, В.В.Болотин, И.И.Казей, Ю.Г.Козьмин, С.И.Конашенко, Г.Ф.Кравченко, Б.Ф.Лесохин, В.П.Орленко, З.Г.Ройтбурд, Ю.А.Радзиховский, В.Ф.Серебрянский, В.П.Тарасенко, Г.Н.



Яковлев и другие ученые. Одним из крупных практических результатов явилось решение вопроса о предельных деформациях пролётных строений, с учётом использования высокопрочных сталей, для капитальных мостов, которое нашло отражение в СНиПе 2.05.03-84.

В то же время применение высокопрочных сталей во временных и краткосрочных мостах сдерживалось действующими нормами проектирования, что объясняется, прежде всего, недостаточной изученностью вопроса о допустимых деформациях пролётных строений этих мостов. Научное направление, связанное с изучением взаимодействия временных мостов и подвижного состава, только начинает складываться. Работа конструкций мостов под воздействием поездных нагрузок рассматривалась в трудах Г.К.Гольста, А.И.Богатырёва, Б.М.Григорьева, А.В.Губина, А.Г.Доильнищина, М.С.Подбелло, В.И.Телова, С.М.Хрвского. Поведению системы "пролётные строения временного моста - одиночный экипаж" посвящены исследования Д.Д.Акимова-Перетца, А.В.Индейкина, В.Е.Осина. Рекомендации В.Е.Осина позволили установить в действующих Технических условиях норму вертикального прогиба в размере  $1/350$  от расчётного пролёта.

Взаимодействие системы в горизонтально-поперечном направлении детально рассмотрено в трудах Г.Н.Яковлева, К.И.Солдатова, В.П.Кисляка, что способствовало решению вопроса о нормировании горизонтальной жёсткости пролётных строений. Однако задача обоснования норм их вертикальной жёсткости, не препятствующих внедрению высокопрочных сталей, оставалась ещё не решённой. Необходимость продолжения работы в этом направлении и определила цель диссертации.

В ней проанализированы существующие требования к вертикальным прогибам и их влияние на эффективность использования для временных мостов тех или иных сталей. На рис. I приведены относительные прогибы пролётных строений, соответствующие различным уровням качества хода подвижного состава, определяемым коэффици-

ентом вертикальной динамики  $\alpha$  по шкале ВНИИЖТа.

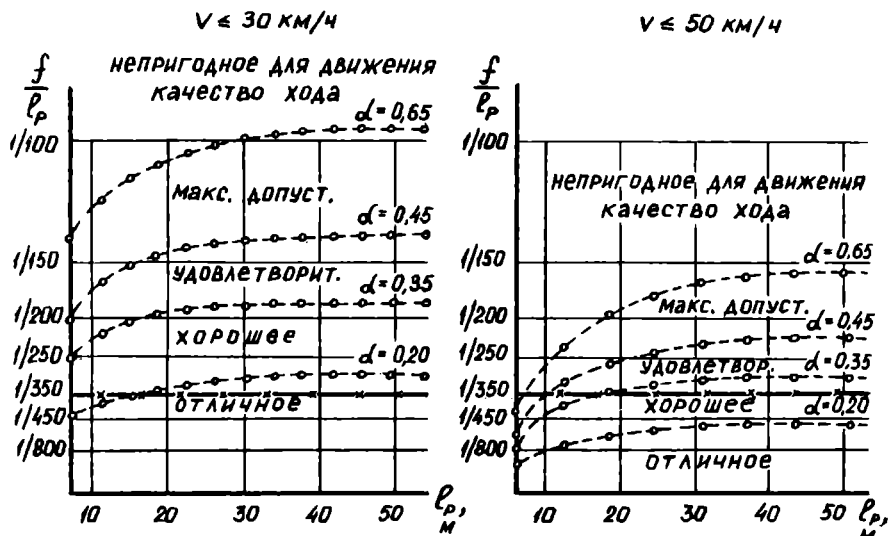


Рис. I

Из графиков видно, что действующая норма прогиба -  $1/350$  пролета - приводит к излишне высокому качеству хода ("хорошему", "отличному" уровням), в то время как при движении поездов по капитальным мостам показатели динамики не должны выходить за рамки "хорошего" качества - для пассажирских и "удовлетворительного" - для грузовых вагонов. "Удовлетворительное" качество хода при движении по временным мостам может быть обеспечено при прогибах до  $1/200 \div 1/250$  пролета. Таким образом, в величине действующей нормы имеется существенный резерв.

Оценка влияния прогибов на эффективность использования сталей (рис. 2) показывает, что полное использование прочностных свойств сталей повышенной и высокой прочности (с пределом текучести  $\sigma_T = 240 \div 600$  МПа), а значит и максимальное снижение

массы конструкций, практически невозможны из-за несоответствия прогибов действующим нормам (ПВКМ-79). Эффект возможен только при допущении прогибов порядка  $1/200 + 1/250$  пролёта.

При анализе существующих норм вертикальной жёсткости использовалась расчётная схема, предложенная Н.Г.Бондарем и позволяющая оценивать величины предельных деформаций по доминирующему виду колебаний экипажей - подпрыгиванию. Однако некоторая специфика конструкции временных мостов обусловила необходимость в более детальном рассмотрении процессов, происходящих в системе "временный мост - поезд". Эта специфика, связанная прежде всего с повышенной деформативностью пролётных строений, требует, помимо рассмотрения известных факторов, определяющих допустимые деформации в капитальных мостах, учёта ещё одного фактора - исключения самопроизвольных расцепов экипажей, которые могли бы произойти

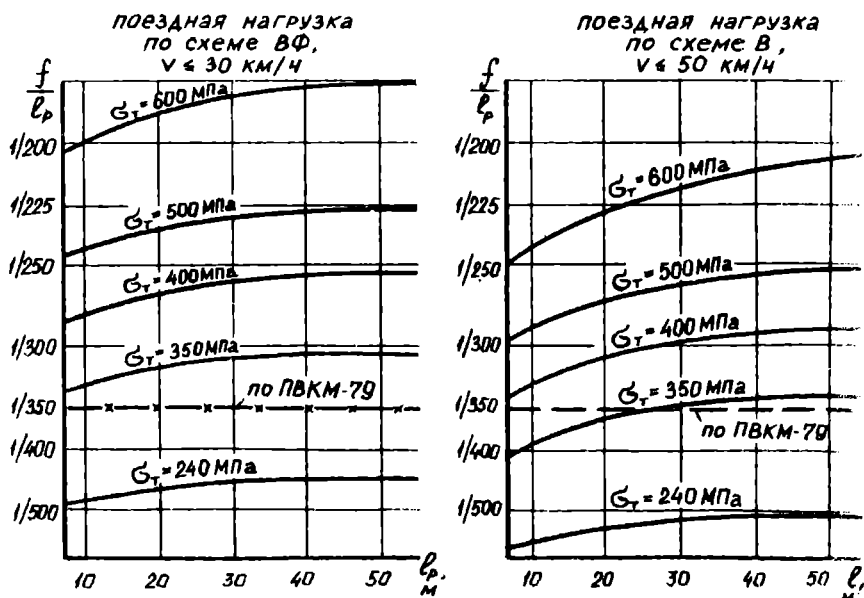


Рис. 2

при слишком больших прогибах и вызванных ими переломах продольного профиля пути. Влиянием этого фактора для капитальных мостов справедливо пренебрегают, поскольку имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о незначительных взаимных смещениях автоцепок при движении по таким мостам.

До настоящего времени при изучении взаимодействия временных мостов с подвижным составом рассматривались только одиночные экипажи, вне связи с остальными, не учитывалась податливость опор моста, не исследовалась работа автосцепки. Последнее обстоятельство вынуждает рассматривать более сложные расчётные схемы, с учётом связанности как минимум двух соседних экипажей, следовательно, и несколько иные математические модели.

Во второй главе предлагаются и обосновываются расчётные схемы взаимодействия системы "временный мост - поезд", автосцепки (рис. 3) и дифференциальные уравнения колебаний, представляющие в совокупности математическую модель происходящих в этой системе процессов.

При разработке модели, ввиду сложности описываемых явлений, были приняты некоторые допущения:

1. Рассматривалось движение поезда с постоянной скоростью по однопутному, идеально прямому, многопролётному балочному мосту с разрезными пролётными строениями одинакового пролёта и с симметричным поперечным сечением.

2. Колебания подвижного состава детерминированно обуславливались неровностями продольного профиля пути, вызванными утругими прогибами пролётных строений, а также принятыми одинаковыми для обеих рельсовых нитей местными неровностями пути - предмостовыми ямами, просадками под стыками, несовпадением уровней головок соседних рельсов.

3. Поскольку основные силы взаимодействия, определяющие про-

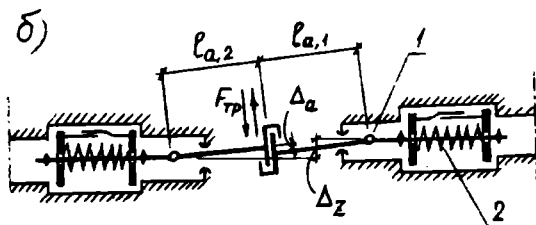
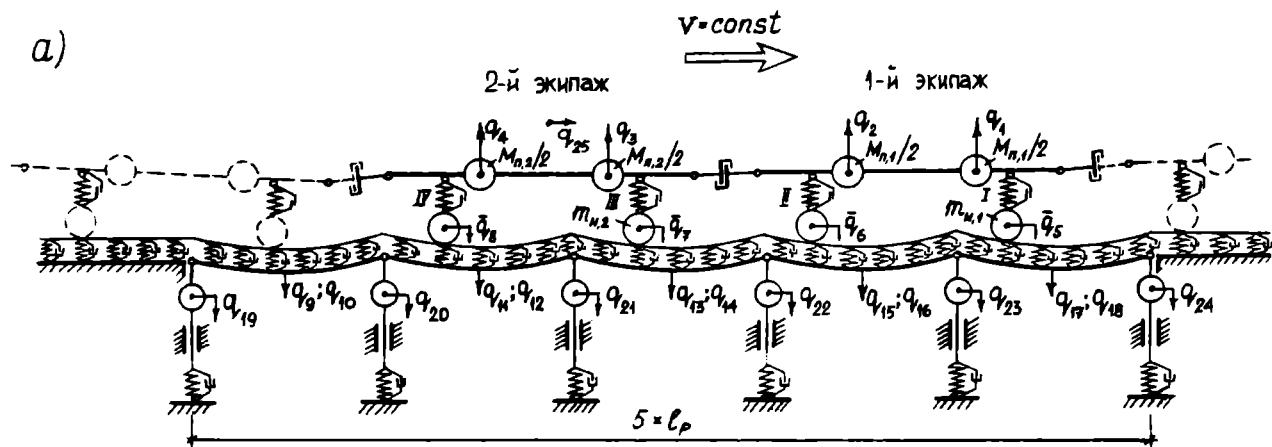


Рис. 3. Расчётные схемы:  $a$  - взаимодействия конструкции временного моста с подвижным составом;  $b$  - автосцепки соседних экипажей;  $q_1 + q_{25}$  - обобщённые координаты;  $M_n, m_n$  - соответственно поддрессоренные и неподдрессоренные массы экипажей; 1 - шарнир; 2 - поглощающий аппарат;  $F_{Tp}$  - силы сухого трения в сцепленных головках;  $\Delta_a$  - взаимное смещение головок;  $\Delta_z$  - смещение уровней шарниров

гибы, действуют в вертикальной плоскости по оси моста, а продольные оси подвижного состава примерно совпадают с осями пролётных строений, поведение системы рассматривалось только в этой плоскости. На основании ранее проведенных исследований считалось, что вертикальные колебания пролётных строений совершаются самостоятельно, независимо от горизонтальных и крутильных.

4. Высокочастотные процессы, характерные для подсистемы "мостовое полотно - ходовые (неподрессоренные) части экипажей", не рассматривались, так как повышенные вибрации в этой подсистеме возникают лишь при скоростях, значительно превышающих эксплуатационные.

5. Перемещения ходовых частей подвижного состава по рельсовому пути на мосту принимались безотрывными.

Исходными данными для модели явились параметры моста, в том числе вертикальная жёсткость пролётных строений, параметры подвижного состава, скорость его движения, а результатом реализации модели - показатели динамики подвижного состава, позволяющие оценить возможность нормальной эксплуатации моста при тех или иных его параметрах.

В модели использована идея метода конечных элементов, распространённая на всю систему "временный мост - поезд". В качестве конечных элементов приняты пролётные строения и опоры моста (16 степеней свободы и обобщённых координат), а также отдельные экипажи поезда (9 обобщённых координат). При выводе дифференциальных уравнений использовался энергетический метод, т.е. определялись кинетическая и потенциальная энергии системы и обобщённые силы, соответствующие внешним нагрузкам, которые затем подставлялись в уравнения Нильсена.

Математическая модель взаимодействия системы "временный мост-поезд" представляет собой две группы дифференциальных уравнений

второго порядка с переменными, зависящими от времени  $t$ , коэффициентами, описывающие колебания:

- пролётных строений и упруго-податливых опор моста, внешней нагрузкой для которых является воздействие неподдрессоренных частей подвижного состава

$$M_m \ddot{q} + [R_m + R(t)]q = P_G - P_{осн}^{нач} \quad (1)$$

- экипажей поезда, где в качестве возмущения фигурируют неровности продольного профиля пути на мосту, обусловленные упругими прогибами и начальными местными неровностями подрельсового основания

$$M_3 \ddot{q} + [R_3 + R(t)]q = P_p^{нач} + P_{осн}^{нач} \quad (2)$$

Связь этих групп уравнений обеспечивается условием безотрывности движения ходовых частей экипажей по рельсовому пути на мосту. Колебания в системе "временный мост - поезд" без учета сил сопротивления описываются уравнениями:

$$M \ddot{q} + [R + R(t)]q = P_G + P_p^{нач} \quad (3)$$

В приведенных формулах  $M_m$ ,  $M_3$  и  $M$  - матрицы коэффициентов инерции соответственно моста, экипажей поезда и системы "мост - поезд",  $M = M_m + M_3$ ;  $R_m$ ,  $R_3$  и  $R$  - постоянные части матриц коэффициентов жёсткости моста, экипажей и системы "мост - поезд",  $R = R_m + R_3$ ;  $R(t)$  - матрица переменных, зависящих от времени  $t$ , коэффициентов жёсткости;  $q$  и  $\ddot{q}$  - векторы-столбцы обобщенных координат с элементами  $q_i$  ( $i = 1 \div 25$ ) и вторых производных по времени (ускорений);  $P_G$  - вектор-столбец сил тяжести, определяющих статические деформации балок под неподдрессоренными массами экипажей;  $P_{осн}^{нач}$  - вектор-столбец сил упругости винклеровского подрельсового основания, обусловленных его начальными местными неровностями;  $P_p^{нач}$  - вектор-столбец сил упругости в рессорных

комплектах, вызванных начальными неровностями рельсового пути;  $M$ ,  $R$  и  $R(t)$  - квадратные матрицы, размер которых  $25 \times 25$  определяется количеством учитываемых степеней свободы.

Из всего многообразия сил сопротивления колебаниям в модели учтены основные:

- внутреннее трение в материале - металле пролётных строений, подрельсовом основании, опорах (для удобства расчетов учтено как эквивалентное вязкое);
- демпфирование колебаний специальными гасителями - клиновыми демпферами сухого трения в рессорном подвешивании экипажей;
- силы сухого трения в сцепленных головках автосцепок, создающие своеобразный демпфер.

Поскольку при реальных эксплуатационных скоростях и состоянии пути, характерных для временных мостов, демпферы могут быть как в рабочем (открытом), так и в заклиненном состояниях, учтены условия перехода их из одного состояния в другое: силовое - для проверки открытия и кинематическое условие - для закрытия демпферов. В случае заклинивания головок автосцепок несколько изменяются жесткостные характеристики рессорного подвешивания экипажей. Однако проведенный численный анализ показал, что вызванные заклиниванием добавки  $\Delta z_{ij}$  к коэффициентам жесткости матрицы  $R_z$  незначительны (до 0,02 %) и ими можно пренебречь.

Рассеивание энергии за счёт внутреннего трения учтено в левых частях уравнений (3) дополнительным членом  $B\dot{q}$ , где  $B$  - матрица затухания в форме Фойгта. Демпфирование колебаний учтено в правых частях этих уравнений двумя векторами:  $P_{дст,о}$  - вектором сил трения в открытых демпферах рессорного подвешивания и автосцепки и  $P_{дст,з}$  - вектором сил, действующих на обобщённые массы и обусловленных остаточными смещениями в закрытых демпферах.

С учётом сил сопротивления колебательные процессы во взаимно-



действующей системе описываются нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка с переменными коэффициентами:

$$M\ddot{q} + B\dot{q} + [R + R(t)]q = P_G + P_P^{нач} + P_{дст,в} + P_{дст,з}. \quad (4)$$

Получить решение такой системы уравнений в явном виде не представляется практически возможным, поэтому было выполнено моделирование колебаний при конкретных исходных данных на ЭВМ.

В третьей главе представлены методика решения уравнений колебаний, описание программного комплекса для численного интегрирования их и приведены основные результаты моделирования.

Методика решения уравнений заключалась в подборе интервала интегрирования таким, чтобы в его границах можно было считать постоянной матрицу переменных коэффициентов жёсткости  $R(t)$ , медленно меняющихся во времени. Учитывая, что между моментами смены состояний демпферов сухого трения, т.е. в пределах одного состояния, уравнения являются линейными, при их решении был применен метод кусочно-линейной аппроксимации. При этом промежуток времени прохода поезда по мосту разбивался на относительно крупные интервалы  $t_i + t_{i+1}$ , продолжительностью по  $0,2 \pm 0,5$  с. В пределах этого интервала матрица переменных коэффициентов жёсткости принималась постоянной, равной  $R(\frac{t_i + t_{i+1}}{2})$ . Далее интервал  $t_i + t_{i+1}$  разбивался на более мелкие, по  $0,05 \pm 0,1$  с., соответствующие временному шагу заданного воздействия от неровности профиля пути. Решение уравнений на малых интервалах строилось на основе интеграла Дуамеля с учётом принятых начальных условий и с использованием главных координат. В конце малого интервала проверялось состояние нелинейных связей - демпферов. При наличии смены состояний момент смены уточнялся путем последовательного деления интервала пополам, затем производилась смена параметров системы в соответствии с новым состоянием, после чего продолжалось

интегрирование до конца малого интервала. При выходе с большого интервала  $t_i + t_{i+1}$  осуществлялась перестройка матрицы  $R(t)$  и процесс повторялся на следующем интервале.

Для реализации описанной методики интегрирования был разработан программный комплекс, представляющий собой дополненный новыми модулями комплекс ДРАКОН-С (динамический расчет мостовых конструкций на сейсмостойкость), созданный в НИИ мостов ЛИИЖТа. Основное дополнение связано с учетом поезда, его нелинейных связей и порождаемой им матрицы  $R(t)$ . Переработка комплекса осуществлена автором совместно с сотрудниками НИИ мостов к.т.н. Уздыным А.М. и инж. Симкиным А.Ю.

Реализация математической модели на ЭВМ позволила выявить следующую картину взаимодействия конструкций временных мостов с подвижным составом. Колебательные процессы во взаимодействующей системе носят неустановившийся характер, резонансные явления и кинематическое возбуждение ввиду малости скоростей движения поезда отсутствуют. Динамические смещения, даже при скоростях до 60 км/ч, не превышали 10 мм, а ускорения подрессоренных частей кузовов экипажей -  $2,0 \text{ м/с}^2$ , что соответствует "хорошему" качеству хода.

На значения показателей динамики влияют скорость движения, коэффициент относительного трения в клиновых демпферах экипажей, жесткость пролётных строений и в меньшей степени - их расчётный пролет. Однако наиболее существенное влияние оказывает состояние рельсового пути на мосту и подходах к нему, наличие местных неровностей, которые могут ухудшить показатели динамики в 2-3 раза. Эти неровности приводят к открытию демпферов рессорного подвешивания. Вместе с тем, как показал анализ спектральных характеристик элементов взаимодействующей системы, влиянием сил трения в головках соседних автосцепок можно пренебрегать.

Величина динамической составляющей взаимного смещения головок автосцепок при скоростях 30-60 км/ч не превысила 1 см. Из этого следует, что в данном диапазоне скоростей смещение головок определяется в основном статической составляющей, обусловленной упругими деформациями пролётных строений под статической позадней нагрузкой. Это позволяет рекомендовать для выявления смещений головок автосцепок, применительно к временным и краткосрочным мостам, использование квазистатических расчётных схем. При прогибах до 1/200 пролёта эти смещения могут достигать 10 см у четырёхосных экипажей и 16 см (при отсутствии ограничителей) - у восьмиосных, т.е. оказываются значительно ближе к допустимым значениям по сравнению с показателями вертикальной динамики экипажей. В этом и проявляется существенная особенность гибких пролётных строений таких мостов.

Основной вывод по результатам теоретического исследования: при вертикальных упругих прогибах пролётных строений до 1/200 от расчётного пролёта обеспечивается нормальная эксплуатация мостов, т.е. выполняются требования второго предельного состояния.

В четвертой главе приведены методика и основные результаты экспериментального исследования, позволяющего проверить соответствие математической модели взаимодействия действительной работе мостовых конструкций и подвижного состава.

Эксперимент проводился по рабочей программе, утверждённой Главным управлением железнодорожных войск, на полигоне в/ч 77043, на опытном мосту с гибкими пролётными строениями облегчённой конструкции пролётом 24,0 м и расчётными прогибами в размере 1/200 пролёта. При этом использовались выпускаемые промышленностью 16-метровые сварные широкополочные двутавровые балки из стали 15ХСНД, которые наращивались в полевых условиях дополнительными кусками по 6 м. Так как типовая конструкция предусматривает при-

мнение четырёх балок, а опытная - только двух, масса опытного строения оказалась вдвое меньше типового. В пути на мосту были уложены рельсы типа Р50, на деревянных шпалах вместо бетонных брусьев.

В качестве испытательного подвижного состава использовались тепловоз ТЗВ, а также гружённые до полной грузоподъёмности четырёхосные и восьмиосные полувагоны. Пролётные строения, опоры моста и подвижной состав были оборудованы современной измерительной аппаратурой, позволявшей производить запись процессов на магнитную ленту и вести визуальный контроль по осциллографу.

В проведении испытаний, кроме автора, участвовали В.П.Польевко, В.П.Бойчун (ИНИИС), М.С.Подбелло (НИИ мостов), Е.П.Бороненко, Ю.П.Кравченко (ЛПИЖТ), О.В.Балицкая, А.М.Трохов (Ленгипротранс-мост), К.А.Жданович, В.Е.Крыльцов (в/ч 25967), В.И.Беда, П.П.Григориадис (ИИ ВНИО ЖДВ), Н.И.Крючков (ЛВУ ЖДВ и ВОСО), М.П.Коптюк, С.Г.Пономарёв, С.Д.Приходько (в/ч 77043).

В ходе эксперимента было сделано в общей сложности более 130 заездов испытательного поезда на мост со скоростями движения от 5 до 43 км/ч (расчётная скорость - 30 км/ч).

Основные результаты проведенных статических и динамических испытаний моста, а также ходовых испытаний подвижного состава сводятся к следующему:

1. В целом подтвердились выявленные в теоретическом исследовании качественная картина взаимодействия в системе "временный мост - поезд" (отсутствие резонансных явлений, кинематического возбуждения) и возможность нормальной эксплуатации моста при пониженной вертикальной жёсткости облегчённых пролётных строений;

2. Фактические прогибы пролётных строений достигали  $1/200$  пролёта, динамические коэффициенты по прогибам не превышали 1,08;

3. Напряжения в главных балках пролётных строений и путевых рельсах находились в допустимых пределах, динамические коэффи-

енты по напряжениям в балках составили I,09-I,11, что на 7 % меньше нормативного значения коэффициента;

4. Показатели динамики подвижного состава по шкале ВНИИЖТа соответствовали: по вертикальной динамике - в целом "хорошему" уровню, по горизонтальной - "удовлетворительному". Самопроизвольных расцепов экипажей не наблюдалось, однако взаимные вертикальные смещения головок соседних автосцепок достигали 10,5 см у четырёхосных, одинаково гружённых, экипажей и 14,5 см - у восьмиосных, что близко к допустимым пределам. Оставшийся в величине этих смещений запас, с учётом начальной несоосности автосцепок, возможной при формировании поезда, составил соответственно 2,5 и 4 см.

5. Горизонтально-поперечная жёсткость опытных пролётных строений оказалась невысокой. Характеристика ее  $C_r$  не превысила 3,0 МН/м (3,0 тс/см). Такую же характеристику имели и серийные пролётные строения СРП-23НС и СРП-33,6НС, включённые в схему опытного моста.

6. Каких-либо расстройств мостового полотна не было выявлено.

Таким образом, испытания также показали, что снижение вертикальной жёсткости и увеличение прогибов пролётных строений в пределах до 1/200 пролёта не вызывают препятствий для нормальной эксплуатации моста.

В пятой главе дана сравнительная оценка полученных экспериментальных данных с результатами моделирования на ЭВМ, рассмотрены требования к горизонтальной жёсткости пролётных строений с учётом взаимосвязи с вертикальными деформациями, предложены рекомендации по нормированию прогибов пролётных строений, показана степень эффективности гибких пролётных строений при проектировании временных и краткосрочных мостов.

Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирова-

ния при аналогичных условиях показали удовлетворительную, в пределах 10-20 %, сходимость и подтвердило правомерность использования разработанной математической модели взаимодействия в системе "временный мост - поезд" для выработки рекомендаций по нормированию прогибов.

В связи с тем, что снижение вертикальной жёсткости пролётных строений в ряде случаев приводит и к уменьшению их горизонтально-поперечной жёсткости, необходимо при нормировании последней учитывать также предельные вертикальные деформации главных балок. Предложена формула, связывающая эти деформации, величины расчётного пролёта и временной вертикальной эквивалентной нагрузки от подвижного состава с требованием к характеристике горизонтальной жёсткости. Данную формулу рекомендуется использовать наряду с известными ограничениями частот свободных горизонтальных колебаний нагруженных пролётных строений, исключающими резонансный режим взаимодействия с подвижным составом. Показано, что горизонтальная жёсткость опытных гибких пролётных строений достаточна для нормальной эксплуатации. Кроме того, даны предложения по простейшему усилению конструкции, обеспечивающему увеличение горизонтальной жёсткости этих пролётных строений в 1,5 раза.

Анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов позволил рекомендовать следующие величины предельных вертикальных упругих прогибов пролётных строений для временных и краткосрочных железнодорожных мостов:

- до  $l/200$  пролёта для конструкций полевого изготовления при скорости движения поездов не более 30 км/ч;
- до  $l/250$  пролёта для инвентарных конструкций пролётом 18 и более метров при скорости движения до 50 км/ч;
- до  $l/300$  пролёта для инвентарных конструкций пролётом менее 18 м.

Во всех случаях при пропуске подвижного состава, оборудованного автосцепкой, углы перелома продольного профиля пути над опорами, с учётом упругих деформаций пролётных строений, не должны превышать  $0,035$  рад.

Оценка эффективности пролётных строений с пониженной вертикальной жёсткостью показала более высокую их эффективность по сравнению с типовыми решениями. Опытные гибкие пролётные строения рекомендованы для использования при проектировании временных и краткосрочных мостов.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Действовавшие до последнего времени нормы вертикальной жёсткости пролётных строений применительно к временным мостам являлись завышенными, затруднявшими эффективное применение для них сталей повышенной и высокой прочности. Это в значительной мере объясняется недостаточной изученностью факторов, обуславливающих предельные деформации в этих мостах. При исследовании взаимодействия мостов с подвижным составом рассматривались только одиночные экипажи, вне связи с остальными, не учитывалась упругая податливость опор в вертикальном направлении, не анализировалась работа автосцепок экипажей при проходе переломов профиля пути над опорами моста, вызванных упругими прогибами пролётных строений.

2. Разработанные в диссертации расчётная схема и математическая модель взаимодействия конструкции временного моста и подвижного состава в вертикальной плоскости, с учётом указанных выше факторов, дают возможность более обоснованно производить оценку показателей динамики и определять предельно допустимые в эксплуатации вертикальные деформации пролётных строений.

3. Реализация математической модели на ЭМ позволяет определить частоты и формы колебаний элементов моста и подвижного состава, вертикальные прогибы пролётных строений, деформации рессорных комплектов экипажей, ускорения их подрессоренных частей, а также величины взаимных смещений головок соседних автосцепок при проходе переломов профиля пути.

4. Как показал анализ результатов теоретического исследования взаимодействия в системе "временный мост - поезд", основными факторами, обуславливающими допустимые деформации пролётных строений, являются: скорость движения; показатели вертикальной динамики подвижного состава, зависящие в основном от состояния пути на мосту и подходах к нему; переломы продольного профиля пути, вызывающие повышенные напряжения в рельсах и взаимные вертикальные смещения головок автосцепок. Условие, исключаящее самопроизвольные расцепы экипажей, имеет определяющее значение для установления величин предельных прогибов. При этом влияние сил сухого трения в головках соседних автосцепок из-за их малости можно не учитывать.

5. Достоверность математической модели взаимодействия подтверждается натурным экспериментом с опытными гибкими пролётными строениями облегчённой конструкции и испытательным подвижным составом. Удовлетворительная сходимость теоретических результатов с экспериментальными данными даёт основание для использования этих результатов при выработке рекомендаций по нормированию вертикальной жесткости облегчённых пролётных строений.

6. Для современных конструкций временных и краткосрочных мостов, обрабатываемых и перспективного подвижного состава, при существующих требованиях к скорости движения по восстановленным участкам и к состоянию пути на них, нормы вертикальных упругих прогибов пролётных строений без ущерба безопасности эксплуатации можно снизить в 1,4 - 1,7 раза.



Предложения по корректировке норм прогибов с  $1/350$  до  $1/200$  и  $1/300$  от расчётного пролёта открывают новые возможности для проектирования облегчённых конструкций, снижения их металлоёмкости на 15-20 %, расширения области применения существующих балочных пролётных строений и, в конечном итоге, для повышения темпов строительства и восстановления мостов.

Основное содержание диссертации опубликовано  
в следующих работах:

1. Красковский В.Е., Шварц М.А. Деформации рельсов в местах перелома профиля пути на временных железнодорожных мостах // Вопросы динамики мостов и теории колебаний / Днепропетровский ин-т инж. ж.-д. транспорта. Днепропетровск. 1984. -с. 74-79.

2. Красковский В.Е. Особенности работы автосцепки восьмиосных полувагонов при проходе по временным мостам // Деп. рукоп. Д14968Д, Д14989Д / Реф. опубл. в "Указателе поступлений инф. материалов" ЦИВТИ. Вып. 2.:М. 1984. - 14 с.

3. Красковский В.Е. Обоснование требований к вертикальным прогибам пролётных строений временных железнодорожных мостов // Научно-техн. сборник статей адъюнктов и соискателей / Воен. акад. тыла и транспорта. Л. 1986. Вып. 6-20.

4. Уздин А.М., Минкин Ю.Г., Красковский В.Е. Программное обеспечение для оценки взаимодействия подвижного состава и моста при сейсмических колебаниях // Строительство и архитектура. Сер. 14. Строительство в особых условиях. Сейсмостойкое строительство / Экспресс-информация. ВНИИС Госстроя СССР.:М. 1987. Вып. 3. -с. 2-7.

5. Красковский В.Е. Обоснование требований к горизонтальной жёсткости пролётных строений временных железнодорожных мостов // Деп. рукоп. Д17030Д, Д17031Д / Реф. опубл. в "Указателе поступл. инф. материалов" ЦИВТИ. Вып. 1. Сер. Е.:М. 1986.

6. Технические условия проектирования временных железнодорожных мостов (ТУВЖМ) // ВНИИ транспортного строительства.: М. 1986. -с. 20,21 (в составе авторского коллектива).



Сканировала Семенова Т.Л.

-----  
Подписано к печати 24.II.89 г.      Усл. печ. л. 1,0  
Формат 60х84 1/16. Печать офсетная. Бумага для множ. аппар.  
Тираж 100 экз.      Заказ № 102      Бесплатно  
-----

РП ЛИИЖТа      190031, г. Ленинград, Московский пр., 9