

Министерство путей сообщения

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА им. М. И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

ПОДБЕЛЛО
Александр Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ
СКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ
С БАЛОЧНЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ
ПРОЛЕТНЫМИ СТРОЕНИЯМИ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Специальность 05.22.07 — Подвижной состав
и тяга поездов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСК
1979

Работа выполнена в Ленинградском институте инженеров железнодорожного транспорта имени академика В. Н. Образцова.

Экспериментальная часть работы проводилась в Научно-исследовательском институте мостов ЛИИЖТа.

Научный руководитель:

заслуженный деятель науки и техники РСФСР

доктор техн. наук, профессор И. И. ЧЕЛНОКОВ

Официальные оппоненты:

доктор техн. наук, профессор М. Л. КОРОТЕНКО

доктор техн. наук, профессор Ю. Г. КОЗЬМИН

Ведущее предприятие — Всесоюзный научно-исследовательский институт вагоностроения.

Защита диссертации состоится « » сентября 1979 г. в « » час на заседании специализированного совета К114.07.01 в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта им. М. И. Калинина (г Днепропетровск, 320629, ГСП, ул. Университетская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан « »

1979 г.

Ученый секретарь

специализированного совета,

кандидат технических наук, доцент

Л.В. Петрович

ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Состояние изучаемой темы и актуальность диссертации

Постановление XXV съезда КПСС "Основные направления развития народного хозяйства СССР на 1976-1980 гг." предусматривает увеличение грузооборота железных дорог на 22%. Для успешного выполнения этого плана необходимо совершенствование железнодорожного транспорта, что немислимо без всесторонних научных исследований, без проникновения в природу динамических процессов взаимодействия пути и подвижного состава.

Взаимодействие пути и подвижного состава всегда являлось важнейшей проблемой транспортной науки. Крупный вклад в ее развитие внесли советские ученые: В.Г.Альбрехт, С.В.Амелин, Е.П.Блохин, М.Ф.Вериго, С.В.Вершинский, И.В.Винокуров, Л.О.Грачева, В.Н.Данилов, О.П.Ершков, А.Ф.Золотарский, А.А.Камаев, Н.Н.Кудрявцев, И.Л.Коротенко, В.А.Лаварян, А.А.Львов, В.Б.Медель, Е.Н.Никольский, М.П.Смирнов, Т.А.Тибиллов, В.Ф.Ушкалов, М.А.Фришман, И.И.Челноков, М.А.Чернышев, Л.А.Шадур, В.Ф.Яковлев и др., а также зарубежные исследователи И.Боммель, Д.КOFFман, Г.Марье, Х.Хейман, Е.Шперлинг.

В их работах всесторонне исследовано взаимодействие подвижного состава и пути различного плана и профиля, кроме особенностей колебаний вагонов и локомотивов при взаимодействии с пролетными строениями железнодорожных мостов, являющимися неотъемлемой частью железнодорожного пути.

Пролетные строения мостов имеют значительно меньшие параметры жесткости, чем путь на подходах к ним. Прогобы их обуславливают дополнительную неровность пути, а частоты колебаний, как показывают эксперименты, очень близки к частоте колебаний кузовов груженых грузовых вагонов. Эти обстоятельства заведомо могут явиться причиной более худшего и даже опасного хода вагонов по мостам, чем на подходах, по прямым участкам пути.

Исследования колебаний пролетных строений железнодорожных мостов и подвижного состава поезда отражено в работах ученых: С.А.Берштейна, В.В.Болотина, Н.Г.Бондаря, Г.П.Бурчака, Е.Е.Гибшмана, И.И.Гольденבלата, Н.И.Казея, К.Е.Китаева, С.И.Конашенко, Б.Ф.Лесохина, С.С.Норейко, Я.Г.Пановко, Е.О.Патона, И.И.Рабиновича, И.К.Снитко, Н.С.Стрелецкого, В.П.Тарасенко, А.П.Филиппова, Г.Н.Яковлева, Ф.Блейха, Б.Брукмана, П.Е.Инглиса, П.Поппа, Л.Фрибы. Эти работы имели главную цель — оценку динамических характеристик и прочности пролетных строений мостов.

6417a

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В.Лазаряна

Решение таких задач производилось для однопролетных мостов, время взаимодействия отдельных вагонов поезда с которыми оказывалось непродолжительным и недостаточным для развития в них неблагоприятных динамических процессов. Интегральное же воздействие поезда на мост было довольно длительным и достаточным для развития интенсивных колебаний пролетного строения. Таким образом, динамика вагонов поезда являлась несущественной и ей не уделялось внимания в исследованиях.

Повышение скоростей движения поездов вызвало более интенсивные колебания вагонов, увеличение сил взаимодействия их с однопролетными и многопролетными мостами, обусловившие больший интерес исследователей. В работах ученых Д.Г.Козьмина, Э.Г.Ройбурда, Д.А.Радзиховского и Э.М.Тененбаума значительное внимание уделяется вертикальному взаимодействию вагонов с многопролетными мостами. Они показали, что колебания вагонов поездов на многопролетных мостах происходят более интенсивно, чем на подходах к ним, при движении по прямому участку пути.

Пространственные колебания вагонов поезда и пролетных строений мостов следует ожидать более сильными, чем вертикальные, так как пространственная жесткость пролетных строений ниже вертикальной. Частота бокового воздействия поезда на рельсы мостового полотна с увеличением скоростей движения приближается к частоте колебаний пролетных строений мостов. Это может вызвать большие амплитуды колебаний подвижного состава, повышение уровня сил взаимодействия между колесом и рельсом, разгрузки колесных пар, сходы колес поездов с рельсов на мосту.

Тенденция в вагоностроении — понижение параметра жесткости рессорного подвешивания грузовых вагонов в вертикальной и горизонтальной плоскостях приводит к улучшению качества хода вагонов по пути и к еще большему сближению частот колебаний упруго-подвешенных частей вагонов и пролетных строений мостов. Такое сближение может явиться причиной ухудшения хода вагонов по мостам. Выбор параметров рессорного подвешивания, типов и параметров связей кузовов вагонов с тележками производится в процессе исследования вариантов конструкции вагонов при движении, в основном, по прямым участкам пути. Взаимодействие вагонов поезда и пути на прямых участках более благоприятное, чем на мостах. При движении по мостам исследований влияния изменений параметров рессорного подвешивания, связей кузовов с те-

лежками на качество хода вагонов обычно не производилось. Безопасность движения поездов по мостам оценивается не по общепринятым для подвижного состава критериям - соотношению сил взаимодействия колеса и рельса, а по обезгруживанию отдельной колесной пары. Исходя из этого нормируются параметры жесткости пролетных строений мостов, их амплитуды и периоды колебаний. Сход колеса с рельсов, как показано специалистами в области подвижного состава, может возникнуть и без полного обезгруживания, при превышении силы бокового давления гребня над вертикальным определенное время.

Предполагаемое повышение скоростей движения грузовых поездов общесетевого парка до 120 км/ч и до 140-160 км/ч специализированных контейнеровозных поездов с тележками с повышенным статическим прогибом рессорных комплектов может вызвать ограничение ("барьер") скорости на мостах.

Мосты строятся на очень длительный срок и остаются неизменными при многих новых конструкциях подвижного состава. Реконструкция их и замена является весьма дорогостоящей. При повышении скоростей движения поездов необходимо обеспечить основное требование, предъявляемое к мостам - пропуск поездов со скоростями, равными наибольшей скорости движения по прямым участкам пути. Для этого необходимо при проектировании и модернизации подвижного состава учитывать особенности его взаимодействия с мостами. Решение поставленной задачи невозможно без методики оценки ходовых качеств вагонов по мостам, которая развита еще недостаточно, а также без применения общих критериев оценки безопасности движения поездов по мостовому полотну и обычному пути на подходах, исходящих из анализа величин сил взаимодействия колеса и рельса.

Цель диссертации. В диссертации поставлена цель - разработка методики, дающей возможность исследовать:

- развитие процессов пространственного взаимодействия поездов с мостами;
- условия наиболее неблагоприятного взаимодействия системы "вагоны поезда + пролетное строение моста";
- особенности движения по однопролетным и многопролетным мостам грузовых поездов с тележками, имеющими различные параметры жесткости рессорного подвешивания и типы связей с кузовом;
- ходовые качества по рекомендуемым шкалам оценок хода;

- возможность пропуска грузовых поездов по мостам с высокими скоростями, на основании анализа сил взаимодействия в системе "колесо-рельс-пролетное строение моста".

В диссертации исследованы процессы движения поездов, сформированных из специализированных контейнеровозных платформ, и, наиболее широко распространенных на железных дорогах, полувагонов. Движение их рассмотрено с тележками с повышенным прогибом рессорных комплектов (скоростными), в создании которых принимал участие автор, и типовыми (ЦНИИ-ХЗ-0). Процессы взаимодействия вагонов исследованы с однопролетными и многопролетными мостами с одинаковыми металлическими пролетными строениями расчетным пролетом более 30 м, параметры пространственной жесткости которых наименьшие.

Научная новизна. Разработана методика и предложены расчетные схемы для исследования пространственных колебаний грузовых вагонов в рамках взаимодействующей системы "поезд-мост", указаны пути их дальнейшего совершенствования и инженерных упрощений.

Исследованы особенности динамики грузовых вагонов с различными типами тележек при движении поезда по мостам с балочными разрезными пролетными строениями и определено качество их хода.

Оценены теоретически силы бокового воздействия колес вагонов на рельсовый путь мостового полотна и изучены особенности движения их тележек по мостам.

Осуществлена оценка безопасности движения поездов по мостам на основании расчета отношения бокового давления гребня колеса на рельс к вертикальному.

Практическая ценность. Методика, изложенная в диссертации, дает возможность оценивать безопасность движения эксплуатируемых, при увеличении скоростей движения, и новых типов вагонов по мостам.

Использование основных положений предлагаемой методики дает возможность решать задачи нормирования вертикальной и боковой (горизонтальной и крутильной) жесткостей пролетного строения, с точки зрения безопасности движения поездов.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов и рекомендаций, списка литературы и отдельного тома приложений. Основной текст диссертации содержит 257 стр., из них машинописного текста 158 стр., иллюстраций 66 стр., табл., 24 стр. использованных литературных источников - 109 наименований на 9 стр. Том приложений состоит из 178 стр.

Введение содержит изложение состояния исследуемой проблемы, ее актуальность и основные направления, разрабатываемые в диссертации.

В первом разделе диссертации проведен краткий обзор истории развития и анализ ранее выполненных исследований по динамике и взаимодействию пролетных строений и подвижного состава поездов. Составлены классификации применяющихся расчетных схем и методов исследований; проанализированы их достоинства и недостатки. Разработана основная идея предлагаемого метода исследований и высказаны соображения по составлению расчетных схем взаимодействующей системы "пролетное строение + подвижной состав поезда".

Во втором разделе разработаны расчетные схемы вагонов поезда и пролетного строения моста, указывается возможность упрощения расчетных схем и уравнений колебаний пролетного строения и поезда на основании теоретических и экспериментальных работ, выполненных ранее различными авторами.

В третьем разделе приведены основные результаты исследований свободных колебаний пролетных строений системы "вагоны грузового поезда (порожние и груженные) + пролетное строение моста". Анализ полученных результатов показал возможность упрощения расчетных схем и составленных по ним уравнений, а также границы применимости этих упрощений.

В четвертом разделе проведены исследования взаимодействия системы "подвижной состав грузового поезда + мост", выявлены особенности развития динамических процессов, критические состояния взаимодействующей системы, изучены особенности динамики вагонов при движении поездов по однопролетным и многопролетным мостам, оценены безопасность движения и ходовые качества платформы-контейнеровозов на скоростных и типовых (ЦНИИ-ХЗ-О) тележках по мостам, возможные границы изменения параметров жесткости рессорного подвешивания.

В пятом разделе приведены результаты экспериментальных исследований взаимодействия грузовых поездов с мостами и их сравнение с результатами теоретических исследований.

Работа завершена выводами и рекомендациями.

Внедрение результатов работы. Результаты проведенных исследований использовались при создании тележки для контейнеровозов Всесоюзным научно-исследовательским проектно-технологическим институтом вагоностроения (г.Кременчуг).

Часть материалов диссертации вошла в комплекс исследований, проведенных в НИИ мостов ЛМИИТа с участием автора, на основании которых приказом Министерства транспортного строительства СССР была принята для серийного изготовления новая конструкция пролетного строения с ортротропной плитой проезда.

Апробация работы. Отдельные результаты исследований были доложены автором:

1. На XXIII научно-технической и научно-методической конференции, посвященной 50-летию образования СССР. ЛМИИТ, 1978 г.

2. На I Всесоюзной научно-технической конференции по проблемам проектирования, строительства и эксплуатации БАМа, посвященной XXV съезду КПСС. ЛМИИТ, 1976 г.

3. На II Всесоюзной научно-технической конференции по проблемам проектирования, строительства и эксплуатации БАМа, посвященной 60-летию Великой Октябрьской социалистической революции. МИИТ, 1977 г.

4. На научно-техническом совещании организаций, участвующих в разработке перспективной тележки для специализированных грузовых вагонов. ВНИПТИ-вагон. Кременчуг, 1976 г.

Диссертация докладывалась и получила одобрение:

- на объединенном семинаре "Общая механика" при Днепропетровском отделении института механики АН УССР. г.Днепропетровск, 1978 г.

- на заседаниях кафедр:

"Мосты" Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта. г.Днепропетровск, 1978 г. ;

"Вагоны и вагонное хозяйство" Московского института инженеров железнодорожного транспорта. г.Москва, 1978 г. ;

"Вагоны и вагонное хозяйство" с приглашением специалистов кафедры "Мосты" Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта. г.Ленинград, 1978 г.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 5 печатных работах и 5 научно-исследовательских отчетах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Краткий анализ основных теоретических методов исследования пространственных колебаний металлических пролетных строений и взаимодействующей системы "пролетное строение + подвижной состав"

Анализ теоретических методов исследования пространственных колебаний металлических пролетных строений и их взаимодействия с подвижным составом поездов, приведенный в первом разделе диссертации, показал:

1. Расчетные схемы подвижного состава, применявшиеся при исследованиях взаимодействия с мостами, целесообразно разделить на две группы: континуальные (представляющие поезд в виде сплошных абсолютно гибких подрессоренных полос) и дискретные (в виде отдельных экипажей - эквивалентных материальных точек).

2. Представление поезда в виде гибкой полосы в исследованиях взаимодействия дает возможность получить достаточно близкое к эксперименту его воздействие на пролетное строение пролетом более 80м. Определение параметров динамики вагонов поезда в этом случае будет весьма приближенным. Более точное представление о динамике поезда, движущегося по мосту, даст схемы дискретного его изображения.

3. Исследования по обеспечению безопасности движения поездов по мостам в опубликованных работах сводятся к нормированию амплитуд и частот горизонтально-поперечных колебаний пролетных строений по условию обезгруживания колесных пар подвижного состава. Сход же колеса с рельса может произойти не только при обезгруживании, но и в случае превышения величины силы бокового давления гребня колеса над вертикальным, в течение времени, необходимого для вкатывания его на рельс. Процессы схода колес с рельсов мостового полотна, а также соответствующие критерии оценки безопасности движения подвижного состава по мостам не рассмотрены ни в одной работе.

4. Различные исследователи теоретически и экспериментально доказали, что пролетные строения совершают четыре основных вида колебаний: вертикальные, горизонтально-поперечные, боковые с деформацией поперечного сечения и горизонтально-продольные. Эти исследования указывают на подобие колебаний пролетных строений и призматических оболочек.

Попытки представления пролетных строений призматическими эквивалентными оболочками имеются в работах Г.П. Бурчака, И.И. Гольден-

блата и П.Ф.Папковича при исследованиях свободных и вынужденных колебаний их под действием движущихся сил и инерционных неподдресоренных нагрузок.

5. Наиболее простые приемы составления дифференциальных уравнений колебаний системы "пролетное строение-поезд" имеют место при совместной дискретности или непрерывности обоих расчетных схем системы.

6. Применение методов исследования взаимодействия поездов и пролетных строений мостов, рассматриваемых соответственно как дискретная и непрерывная системы, дает возможность в отличие от остальных, наиболее точно отображать динамические процессы взаимодействия. Такие методы весьма сложны. Решение их уравнений возможно только на ЭВМ с большим объемом памяти и высоким быстродействием. Обычно исследователи для упрощения полученных уравнений пренебрегали многими факторами (особенностями колебаний подвижного состава, возможной многопролетности моста, боковой качкой пролетного строения и другими), могущими оказывать решающее влияние на развитие взаимодействия при высоких скоростях движения. Учет же этих факторов еще больше увеличивает сложность и громоздкость исследований.

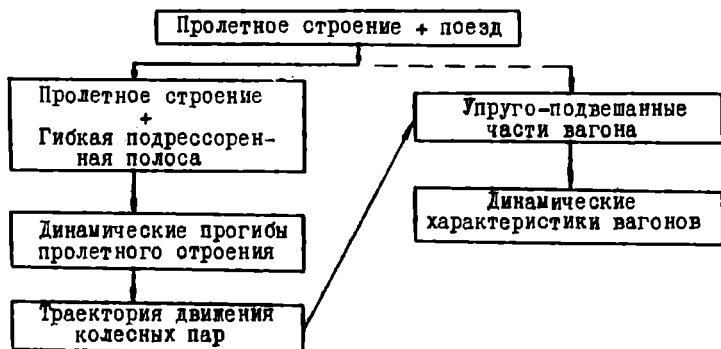
7. Анализ проведенных работ дает возможность упрощать сложную взаимодействующую систему "поезд-мост" расчленением ее на две отдельные, связанные в процессе исследований подсистемы.

Первая подсистема предусматривает исследование совместных связанных колебаний пролетных строений и подвижного состава поезда. В ней расчетная схема пролетного строения учитывает все основные виды его колебаний. В качестве расчетной схемы может быть применена оболочка. Расчетная схема подвижного состава должна быть относительно простая, например, гибкая полоса (при пролетах более 30 м), либо отдельные дискретные одноосные или двухосные экипажи (при пролетах менее 30 м). Это достаточно, как показали ранее выделенные исследования, для получения достоверной информации о колебаниях пролетного строения.

Вторая подсистема предусматривает исследование колебаний вагонов поезда, рассматривая их как отдельные, весьма сложные, в зависимости от цели исследования, расчетные схемы. Исследуемые вагоны движутся по пути с неровностями, представляющими суперпозицию собственных неровностей мостового полотна и статико-динамических пространственных прогибов пролетных строений, определяемых из решения

уравнений первой подсистемы, изменяющихся во времени с частотой вынужденных ее колебаний.

Последовательность исследования взаимодействия пролетных строений мостов (рассматриваемых как оболочки, пролетом более 30 м) с подвижным составом поездов, по предлагаемой методике, приведена на рисунке.



Возмущения во взаимодействующей системе "пролетное строение + поезд" можно задавать собственными неровностями рельсового пути на мосту и извилистым движением тележек как автоколебательный процесс.

2. Основные положения к исследованию и дифференциальные уравнения динамического равновесия взаимодействующей системы "пролетное строение + подвижной состав грузового поезда"

Во втором разделе диссертации, на основании анализа конструкций современных тележек отечественных грузовых вагонов, а также результатов работ по классификации и анализу конструкций тележек отечественного и зарубежного подвижного состава, проведенных ЛИИЖТом, составлена обобщенная расчетная схема грузового вагона, идущего по мосту в составе поезда, и уравнения, описывающие его колебания.

Результаты анализа работ, проведенных ЦНИИ МПС, МИИТ, ДИИТ, ДОИМ, ЛИИЖТ, доказывающих малое влияние ряда факторов (упругости буксовых узлов, продольных колебаний) на колебания кузова вагона, дали возможность упростить обобщенную расчетную схему до системы с семью степенями свободы. В ней отображены колебания подпрыгивания, галопирования, бокового отбоя, виляния, боковой качки и угловых колебаний наддрессорных балок вокруг продольной оси тележек (перевалка кузова).

Количество уравнений, составленных по обобщенной расчетной схеме, было уменьшено с 32 до 7 путем замены ряда их уравнениями связи.

Система дифференциальных уравнений в матрично-векторной форме, описывающих колебания вагона, имеет вид:

$$M \|\ddot{q}_i\| + C \|\dot{q}_i\| + B_1 \|q_i\| + B_2 \|\text{sign } \dot{\Delta}_i\| = Q, \quad (1)$$
 где $\|q_i\|$ - вектор обобщенных координат; $\|\text{sign } \dot{\Delta}_i\|$ - вектор изменения знака; M, C, B_1, B_2, Q - матрицы членов инерции, жесткости, линейного сопротивления, нелинейного сопротивления и обобщенных сил взаимодействия колеса и рельса, соответственно.

Расчетная схема пролетного строения была составлена на основании классических допущений теории призматических оболочек, разработанной акад. В.Э. Власовым. Взаимодействующий с пролетным строением грузовой поезд был представлен в виде гибкой полосы в поперечном сечении, имеющей вид, аналогичный расчетной схеме вагона с распределенными массами, параметрами гасителей и упругостей рессорного подвешивания. Предполагалось, что перевалка кузова на пятниках происходит с частотой, приблизительно равной 1 гц, за счет упругих деформаций пятникового узла, параметр жесткости которого имеет линейную аппроксимацию. Близость к такой частоте перевалки кузовов вагонов была зафиксирована при движении по прямому участку пути экспериментаторами УВВ, а при взаимодействии с пролетными строениями мостов - автором. жесткость пути на мосту была принята постоянной.

Уравнения колебаний системы "пролетное строение + подвижной состав поезда" составлялись вариационным методом В.Э. Власова - приведения трехмерной континуальной проблемы к двумерной контактной задаче, как оболочки многосвязного контура и Лагранжа:

$$\begin{aligned} \frac{E}{G} \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} U_i'' - \sum_{i=1}^m b_{ji} U_i - \sum_{k=1}^n c_{jk} V_k' + \frac{1}{G} p_j &= 0; \\ \sum_{i=1}^m c_{ki} U_i' + \sum_{k=1}^n z_{kk} V_k'' - \frac{E}{G} \sum_{k=1}^n s_{kk} V_k + \frac{1}{G} q_k &= 0; \\ \frac{\partial n}{\partial U_i} &= p_i; \quad \frac{\partial n}{\partial V_k} = q_k \end{aligned} \quad (2)$$

Вдеовь:

$$P_j = - \frac{d^2}{dt^2} \left[\sum_i U_i(z, t) \int \frac{\delta^2(s)}{g} \varphi(s) \varphi_i(s) d\mathcal{F} + \sum_i U_i(z, t) \int \frac{\delta^2(s)}{g} \varphi_i(s) \varphi_j(s) d\mathcal{F} + \sum_i \bar{U}_i^{(n)}(z, t) \int \frac{\delta^2(s)}{g} \bar{\varphi}_i^{(n)}(s) \varphi_j(s) d\mathcal{F} + \sum_i U_i^{(n)}(z, t) \int \frac{\delta^2(s)}{g} \bar{\varphi}_i^{(n)}(s) \varphi_j(s) d\mathcal{F} + \sum_i \bar{U}_i^{(n)}(z, t) \int \frac{\delta^2(s)}{g} \varphi_i^{(n)}(s) \varphi_j(s) d\mathcal{F} + \sum_i \bar{U}_i^{(nn)}(z, t) \int \frac{\delta^2(s)}{g} \varphi_i^{(nn)}(s) \varphi_j(s) d\mathcal{F} \right];$$

$$Q_h = - \frac{d^2}{dt^2} \left\{ \sum_i V_i(z, t) \left[\int \frac{\delta^2(s)}{g} \psi_i(s) \psi_n(s) d\mathcal{F} + \int \frac{\delta^2(s)}{g} \eta_i(s) \eta_n(s) d\mathcal{F} \right] + \sum_i V_i(z, t) \left[\int \frac{\delta^2(s)}{g} \psi_i^{(6)}(s) \psi_n(s) d\mathcal{F} + \int \frac{\delta^2(s)}{g} \eta_i^{(6)}(s) \eta_n(s) d\mathcal{F} \right] + \sum_i V_i^{(n)}(z, t) \left[\int \frac{\delta^2(s)}{g} \bar{\psi}_i^{(n)}(s) \psi_n(s) d\mathcal{F} + \int \frac{\delta^2(s)}{g} \bar{\eta}_i^{(n)}(s) \eta_n(s) d\mathcal{F} \right] + \sum_i \bar{V}_i^{(6)}(z, t) \left[\int \frac{\delta^2(s)}{g} \bar{\psi}_i^{(6)}(s) \psi_n(s) d\mathcal{F} + \int \frac{\delta^2(s)}{g} \bar{\eta}_i^{(6)}(s) \eta_n(s) d\mathcal{F} \right] + \sum_i \bar{V}_i^{(p)}(z, t) \left[\int \frac{\delta^2(s)}{g} \bar{\psi}_i^{(p)}(s) \psi_n(s) d\mathcal{F} + \int \frac{\delta^2(s)}{g} \bar{\eta}_i^{(p)}(s) \eta_n(s) d\mathcal{F} \right] + \sum_i \bar{V}_i^{(kn)}(z, t) \left[\int \frac{\delta^2(s)}{g} \bar{\psi}_i^{(kn)}(s) \psi_n(s) d\mathcal{F} + \int \frac{\delta^2(s)}{g} \bar{\eta}_i^{(kn)}(s) \eta_n(s) d\mathcal{F} \right] \right\}$$

$A_{ij}, \delta_{ji}, C_{j\kappa}, C_{hi}, z_{h\kappa}, s_{h\kappa}$ — коэффициенты вариационных уравнений В.Э.Власова, определенные интегрированием эпюр функций, аппроксимирующих перемещения системы; $\psi(i, j, h, \dots), \varphi(i, j, \kappa, \dots), \eta(i, h, z, \dots)$ — аппроксимирующие функции перемещений системы — тангенциальные и нормальные в плоскости и из плоскости сечения; $V_\kappa, U_i, V_\kappa^{(n)}, U_\kappa^{(n)}$ — обобщенные координаты перемещений системы соответственно в плоскости и из плоскости ее сечения; E, G — модули упругости рас-

тяжения-сжатия и сдвига; P_j , Q_n - обобщенные силы инерции, рассеивания энергии, веса, фиктивные - строительного подъема, действующие в плоскости и из плоскости поперечного сечения системы;

Π - потенциальная энергия вагонов поезда, находящихся на пролетном строении.

Полученные восемь дифференциальных уравнений второго порядка описывали вертикальные, горизонтальные и боковые колебания пролетного строения с деформацией поперечного сечения, подпрыгивание, боковой отход, боковую качку и перевалку кузовов вагонов поезда на платформах. Эти уравнения учитывали влияние перерезывающих сил, инерции вращения, деформации кручения поперечных сечений пролетного строения и скоростных эффектов взаимодействия.

Граничные условия для решения уравнений были приняты как для балок, имеющих шарнирное опирание.

8. Исследование свободных пространственных колебаний взаимодействующей системы "пролетное строение + подвижной состав грузового поезда"

В третьем разделе диссертации для выявления основных закономерностей колебаний пролетного строения и взаимодействующего с ним подвижного состава грузового поезда были исследованы колебания пролетных строений и системы "грузовой поезд + пролетное строение".

Решение уравнений производилось аналитическими методами с последующей реализацией на ЭВМ. Объектами исследований являлись: пролетные строения (опытные с ортотропной плитой проезда, проектировки ЛТМЛ и болтосварные со сквозными фермами в северном исполнении, проектировки ГТМЛ) и грузовые поезда (из металлических полувагонов, постройки УВЗ и контейнеровозных платформ с типовыми (ЦНИИ-ХС-0) и скоростными; с повышенным прогибом рессорных комплектов, тележками).

Исследования свободных колебаний дало возможность:

- показать правильность аппроксимации пролетного строения призматической оболочкой, подтверждаемую хорошим совпадением частот колебаний, вычисленных теоретически, с результатами экспериментов (расхождение до 2-4 %);

- упростить систему (2), пренебрегая влиянием инерции вращения поперечных сечений деформации, перерезывающих сил, центростремительных и, при переносном вращательном движении, корислисовых ускорений на частоты колебаний системы "подвижной состав грузового поезда + пролетное строение моста" (влияние 3-5%);

- определить частотный спектр и формы колебаний системы, показав, что наиболее неблагоприятные процессы могут развиваться при взаимодействии грузовых поездов с пролетными строениями мостов средних и больших пролетов;

- показать возможность применения в исследованиях взаимодействия груженых и порожних поездов с мостами малых и средних пролетов расчетных схем пролетных строений в виде балок, совершающих только вертикальные и горизонтально-поперечные колебания, а также необходимость учета в исследованиях взаимодействия груженых грузовых поездов с пролетными строениями мостов больших пролетов, при скорости движения свыше 120 км/ч, боковых колебаний (качки) последних;

- предложить формулы для определения частот совместных колебаний подвижного состава грузового поезда и пролетного строения моста.

4. Исследование вынужденных пространственных колебаний и взаимодействия системы "пролетное строение + подвижной состав грузового поезда"

В четвертом разделе диссертации выполнены исследования и приведены:

- результаты анализа основных возмущающих факторов, действующих на систему "пролетное строение + подвижной состав поезда", проведенного для выбора возмущений, используемых в исследованиях;

- результаты анализа работ по решению проблемы механики схода колеса с рельса, давшие возможность изыскать критерий оценки безопасности движения вагонов поезда по мостам;

- результаты проведенных исследований вынужденных пространственных колебаний и взаимодействия пролетных строений с грузовыми поездами, состоящими из контейнеровозных платформ на типовых и скоростных тележках без скользунов-демпферов и оснащенных ими.

Неровности рельсового пути, как известно, являются одной из основных причин, вызывающих колебания движущихся экипажей. Изучение их посвящено много работ как советских, так и зарубежных ученых. Анализ этих работ показывает, что все они посвящены исследованиям неровностей рельсового пути на прямых участках, кривых и стрелках, а о характере неровностей пути на мостах отсутствуют необходимые сведения.

При исследованиях совместных колебаний вагонов и пролетных строений мостов в первом приближении к действительности было сделано до-

пушение о совпадении вертикальных неровностей на подходах и на мосту. Расчетные неровности имеют двугорбовую конфигурацию, отображающую волнообразность пути. Разрывы рельсов в стыках приняты через 25 м. В поперечно-горизонтальной плоскости возмущением является извилистое автоколебательное движение тележек с учетом влияния на него пространственного искривления рельсов мостового полотна при колебаниях.

Возмущение от извилистого движения тележек для полосы, эквивалентно заменяющей поезд, введено в уравнения с понижающим амплитуду влияния коэффициентом, равным 0,5. Он учитывал взаимопогашение действия отдельных тележек на пролетное строение, определяемое по методике В.П.Тарасенко.

Оценка возможности схода подвижного состава с рельсов мостового полотна определена по критерию, предложенному С.В.Андреевским и В.А.Крыловым. Он был выбран на основании анализа работ М.Ф.Вериго, С.В.Вершинского, А.У.Галеева, В.Н.Иванова, А.Я.Когана, В.М.Кондрашова, М.Л.Коротенко, В.А.Лазаряна, Г.Марье, И.И.Николаева, В.Ф.Ушкалова, В.А.Шевалина, Х.Хеймана, Цеглинского, Дюбланкера. Применительно к движению вагонов по мостам этот критерий преобразован к следующему виду:

$$\left(\frac{y}{p}\right)_{\min} = \operatorname{tg} \left[\gamma - \alpha \operatorname{ctg} (1 - 0,002 U) \frac{4,1 U_1}{\sqrt{1 - 16,8 U_1^2}} f_0 \right],$$

где

$$U_1 = \frac{100}{\cos \mu} [|\psi_T| + |x_n \xi|].$$

Для определения опасного времени вкатывания гребня колеса на рельс использовано соотношение, предложенное Хейманом, записанное применительно к исследованию взаимодействия колесных пар с рельсами мостового полотна в виде:

$$t_{\text{он}} = \frac{d_0}{U \sin(|\psi_T| + |x_n \xi|)}$$

Здесь обозначено: y, p - горизонтальное и вертикальное давление гребня колеса на рельс; μ - угол наклона гребня колеса к оси колесной пары; U - скорость движения; $(|\psi_T| + |x_n \xi|)$ - угол набегания на рельс мостового полотна; f_0 - коэффициент трения скольжения; d_0 - проекция прямого участка гребня колеса на ось колесной пары.

Уравнения, отображающие колебания пролетных строений моста под действием поезда (2) и движения по нему отдельного вагона (1), с учетом автовозбуждения виляния тележек, были связаны переменными коэффициентами, учитывающими время прохождения колесными парами вагона сечений пролетных строений и линию их прогибов, аппроксимированную функцией:

$$f(\sigma, t, l) = A \left| \sin \frac{\pi \sigma t}{l} \right|$$

Система уравнений для исследования процессов взаимодействия поезда и моста имела 42 порядок относительно первой производной и матричную запись, аналогичную (1).

Решение уравнений производилось на ЭВМ БЭСМ-4 и БЭСМ-4М по программе, составленной в кодах указанных машин методом Рунге-Кутты.

Начальные условия для решения уравнений отвечали стационарным процессам движений экипажа по перегону и колебаниям пролетного строения под воздействием проходящего поезда.

Объектами исследований являлись металлические полувагоны постройки УВЗ и контейнеровозные длинобазные платформы на типовых (ЦНИИ-ХЗ-0) и скоростных (с повышенным прогибом рессорных комплектов) тележках, оснащенных и не оснащенных скользунами-демпферами. Их колебания исследовались при движении по прямым участкам пути и взаимодействии с однопролетными и многопролетными мостами, имеющими пролетные строения:

- опытные, с ездой поверху и ортотропной плитой проезда, проектировки ЛГТМ;
- магистральные типовые, с ездой понизу, сквозными главными фермами, проектировки ГТМП в северном исполнении.

В процессе исследований были определены: вертикальные и поперечно-горизонтальные ускорения пятников, деформации рессорных комплектов, амплитуды подпрыгивания, галопирования, виляния, бокового отбоя, боковой качки и перевалки кузюлов вагона. Найдены силы бокового воздействия гребней колесных пар на рельсы, частоты виляния тележек, допустимые и действительные коэффициенты нарушения устойчивости движения (соотношения $(\frac{\gamma}{\rho})_{min}, \frac{\gamma}{\rho}$), время вкатывания колеса на рельс. Рассчитаны динамические коэффициенты главных ферм, амплитуды горизонтальных колебаний в уровне нижней горизонтальной фермы, боковой качки и деформации поперечных сечений пролетных строений.

Ограничение объема диссертации инструкциями ВАК СССР дало возможность поместить лишь небольшую часть результатов научных исследо-

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

в
4179

ваний, а именно: результаты исследований взаимодействия мостов с контейнеровозными платформами и, частично, с полувагонами.

Проведенные исследования показали:

1. Основными факторами развития динамических процессов при совместных колебаниях системы "пролетное строение + поезд" является периодичность повторяемости неровностей пути на мосту, интенсивность влияния тележек экипажей поезда, связанность частот взаимодействующей системы и время взаимодействия.

2. Пролетные строения малых (33-44 м) и средних (55,66,77 м) пролетов при взаимодействии с грузовыми поездами, идущими со скоростями до 160 км/ч, совершают, в основном, горизонтальные колебания с деформацией поперечного сечения. У пролетных строений больших пролетов (110 м и более) при скоростях движения груженых грузовых поездов до 140-160 км/ч могут появиться близкие к резонансу боковые колебания с деформацией поперечного сечения, с возникновением которых следует считаться в исследованиях.

3. Движение вагонов поезда по однопролетным мостам является переходным процессом, зависящим от начальных условий входа на мост. При движении экипажей по многопролетным мостам большой длины их взаимодействие принимает характер, близкий к установившемуся.

4. Вертикальные и горизонтальные ускорения и деформации рессорных комплектов груженых вагонов с тележками ЦНИИ-ХЗ-0 при движении по однопролетным мостам снижаются по сравнению с этими параметрами, зафиксированными на подходах к мосту, и повышаются на многопролетных мостах.

Наибольших значений ускорения и деформации рессорных комплектов тележек ЦНИИ-ХЗ-0 груженых вагонов достигают на мостах с пролетными строениями средних и больших пролетов.

5. Уровень вертикальных и горизонтальных ускорений и динамические деформации рессорных комплектов груженых вагонов со скоростными тележками на однопролетных и многопролетных мостах выше, чем на прямом участке пути. Наибольших значений они достигают на мостах средних и больших пролетов.

6. Примерно те же особенности в изменении значений ускорений и деформаций рессорных комплектов наблюдаются у порожних вагонов с тележками ЦНИИ-ХЗ-0 и скоростными.

7. Взаимодействие ходовых частей экипажей с мостовым полотном характеризуется

- увеличением длины волны влияния на мосту;
- резкой несимметричностью бокового воздействия колесных пар на рельсы мостового полотна;
- снижением общего уровня бокового воздействия на мостовое полотно с одновременным появлением отдельных отжатий рельсов, по своим значениям превосходящих эти величины, зафиксированные на прямом участке пути на 85-40% для груженных и 25-80% для порожних вагонов.

Количество появления максимальных боковых воздействий имеет определенную регулярность, а именно: на мостах малых пролетов оно равно, для экипажа I, средних пролетов 2-8, больших 8-4, что совпадает с числами непогашенных боковых воздействий тележек поездов на мосты, определенными В.П.Тарасенко путем обработки большого количества экспериментальных данных.

8. Сравнение ходовых качеств длиннобазных контейнерных платформ с различными тележками при движении по прямым участкам пути, однопролетным и многопролетным мостам показало:

- ходовые качества груженных платформ при движении по прямым участкам пути со скоростными тележками с повышенным прогибом рессорных комплектов лучше, чем с типовыми ЦНИИ-ХЗ-0 по уровню вертикальных и горизонтальных ускорений в среднем на 80-85% и 40-45% соответственно, по боковому воздействию на путь - 20-25%. У порожних платформ уровень вертикальных и горизонтальных ускорений снижается на 25-30% и 60-70% соответственно, а боковое воздействие на путь уменьшается на 30-85%;
- ходовые качества груженных платформ при движении по мостам со скоростными тележками лучше, чем с типовыми ЦНИИ-ХЗ-0 по уровню вертикальных и горизонтальных ускорений, в среднем на 85-40% и 40-45% соответственно; по боковому воздействию на путь на 20-80%. У порожних платформ уровень вертикальных и горизонтальных ускорений снижается на 15-20% и на 80-85% соответственно, а боковое воздействие на путь уменьшается на 10-15%;
- вертикальные и поперечно-горизонтальные ускорения пятников кузовов платформ со скоростными тележками и деформации рессорных комплектов последних при движении по мостам, по сравнению с прямыми участками пути, больше, чем у платформ с типовыми тележками;
- динамическое воздействие порожних и груженных платформ со скоростными и типовыми (ЦНИИ-ХЗ-0) тележками на пролетные строения мостов в вертикальной и горизонтальной плоскостях примерно одинаково.

9. Сход с рельсов колес вагонов грузового поезда со скоростными и типовыми (ЦНИИ-ХЗ-О) тележками при скорости движения не выше конструкционной, на мостах с пролетными строениями с параметрами жесткости, нормированными техническими условиями СН 200-62, в теоретических исследованиях не обнаружен. При взаимодействии порожнего подвижного состава с пролетными строениями больших пролетов замечена тенденция к вкатыванию гребня колеса на рельсы мостового полотна со временем не более опасного.

10. Исследование ходовых качеств подвижного состава, оснащенного скользунами-демпферами, при движении его по прямым участкам пути и мостам показало:

- скользуны-демпферы значительно улучшают качество хода грузовых груженых и порожних вагонов по прямым участкам пути, снижая вертикальные ускорения, в среднем, на 15-20%, а поперечно-горизонтальные на 40-45%;

- при взаимодействии поездов с многопролетными мостами оснащение тележек скользунами-демпферами позволяет снизить вертикальные ускорения, передаваемые на кузова груженых вагонов с типовыми тележками (ЦНИИ-ХЗ-О), при движении по мостам малых пролетов на 35-40%, средних пролетов на 20-25%; со скоростными тележками на 10-15% (при взаимодействии с мостами малых пролетов) и на 15-20% (при взаимодействии с мостами средних пролетов);

- горизонтально-поперечные ускорения кузовов груженых вагонов с типовыми и скоростными тележками снижаются, в среднем, скользунами-демпферами при взаимодействии с многопролетными мостами малых пролетов на 60-70%, средних пролетов на 50-60%, больших на 40-50%;

- на вертикальные ускорения кузовов порожних вагонов при их движении по многопролетным мостам скользуны-демпферы оказывают незначительные влияния, горизонтальные ускорения снижаются при скорости движения более 100 км/ч на 40-50%;

- скользуны-демпферы уменьшают боковое воздействие гребней на рельсы мостового полотна, подвижного состава на пролетное строение, в среднем, в 1,5-2 раза, увеличивает устойчивость движения вагонов.

5. Экспериментальные исследования динамических процессов взаимодействия грузовых поездов и пролетных строений

В пятом разделе диссертации освещены основные результаты экспериментальных исследований взаимодействия грузового подвижного со-

става и перспективных опытных строений с ортотропными плитами проезда, проведенными на испытательном полигоне с участием автора, а также результаты экспериментальных исследований взаимодействия грузового поезда с магистральными мостами, проведенных ДИИТом. Оценено расхождение результатов (ускорений кузовов вагонов, деформаций рессорных комплектов, динамических коэффициентов и прогибов пролетных строений), полученных экспериментально и теоретически по предлагаемой методике.

Сопоставление этих результатов показало их хорошее совпадение, свидетельствующее о правильности предпосылок, заложенных в разработанную теорию (расхождение составляет 8-15%).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Вагоны с тележками с повышенным статическим прогибом рессорных комплектов (60-65 мм для брутто) обладают улучшенными ходовыми качествами при движении по мостам и прямым участкам пути по сравнению с вагонами, имеющими тележки ЦНИИ-ХЗ-0.

2. Установка скользунов-демпферов между кузовом и тележкой дает возможность значительно уменьшить величины ускорений кузовов вагонов и сил горизонтального воздействия их колес на путь и мосты, а также увеличить скорости движения порожних и груженых поездов. Параметры скользунов-демпферов следует значать: вертикальную жесткость $C_z^{CK} = 400-600$ кг/см; силу вертикального сопротивления для указанных границ жесткости $F_z^{CK} = -2,5 C_z^{CK} + 2500$ (кг); момент, демпфирующий вращение - 1,5 тм - 1,7 тм.

3. Грузовые поезда (груженные и порожние) из вагонов с серийными тележками (ЦНИИ-ХЗ-0) и тележками с повышенным статическим прогибом рессорных комплектов возможно пропускать по однопролетным и многопролетным мостам со скоростями 120-140 км/ч соответственно, без опасности схода колес с рельсов мостового полотна.

4. Выбор параметров упругого поддешивания кузовов проектируемых вагонов следует производить на основании теоретической оценки ускорений кузова, статических и динамических деформаций рессорных комплектов, сил взаимодействия колес с рельсами при исследованиях движения вагона по прямому участку пути. Устойчивость колес вагона против схода с рельсов при движении с конструкционными скоростями следует проверять на многопролетных мостах средних и больших пролетов.

5. Разработанная и изложенная в диссертации методика для исследования пространственных колебаний грузовых вагонов и пролетных строений взаимодействующей системы "поезд + мост" может быть использована:

- для исследования взаимодействия ходовых частей вагонов с рельсами мостового полотна и оценки безопасности движения по одно-пролетным и многопролетным мостам вагонов пассажирских и грузовых поездов с различными новыми типами тележек;
- для установления нормативных параметров поперечно-горизонтальной и боковой жесткостей пролетных строений мостов на основании анализа сил взаимодействия в системе "кузов-колесо-рельс-пролетное строение моста".

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО

в следующих работах:

1. И.И.Челноков, Г.В.Левков, А.М.Подбелло. Выбор параметров упруго-диссипативных связей между кузовом и тележкой скоростной грузовой платформы для БАМа. Труды МИИТа, вып. 518. М., 1977, с.88-92.
2. Левков Г.В., Подбелло А.М., Тененбаум Б.Я. Установление рациональных параметров упруго-диссипативных связей кузова грузового вагона с тележкой. Труды ЛИИЖТа, вып.408. Л., 1977, с.80-87.
3. Подбелло А.М. К вопросу обеспечения безопасности движения грузовых поездов по мостам. Труды ЛИИЖТа, вып.417. Л., 1978, с.76-83.
4. Подбелло А.М. Исследования динамики грузовых вагонов при движении по типовым пролетным строениям железнодорожных мостов БАМа. Тезисы докладов научно-технической конференции по проблемам проектирования и эксплуатации БАМа. Л., 1978, с.127-128.
5. Подбелло А.М. Методы исследования свободных и вынужденных колебаний металлических сквозных пролетных строений железнодорожных мостов как пространственных систем. Тезисы докладов XXVIII научно-технической конференции студ.научн.общества.ЛИИЖТа. Л., 1969, с.6-10.

Подписано к печати 20.06.1979 г. Усл.печ.л. I. Уч.изд.л. I.
Тираж 120 экз. Заказ 771 и -31132. Бесплатно.
Бумага для множ.аппаратов. Формат бумаги (60х84/16).

РТП ЛИИЖТа. Ленинград, Московский пр., 9.