

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА имени М.И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

МОКРИЙ Татьяна Федоровна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СКОРОСТНЫХ
ПАССАЖИРСКИХ ЭКИПАЖЕЙ

05.22.07 – Подвижной состав и тяга поездов

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Днепропетровск - 1980

Работа выполнена в Днепропетровском отделении Института
механики Академии наук Украинской ССР.

Научный руководитель

Заслуженный деятель науки УССР, академик АН УССР, доктор
технических наук, профессор В.А. ЛАЗАРЕНКО.

Научный консультант

кандидат технических наук, доцент В.Д. ДАНОЗИМ.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор М.Л. КОРОТЕНКО,
доктор технических наук А.А. ЛЬВОВ.

Ведущее предприятие - Калининский филиал Всесоюзного
исследовательского института вагоностроения

— готовится "2" июня 1980 г. в " " час.
— специализированного совета К 114.07.01 в Днепро-
— Петровского Красного Знамени институте инжене-
— рского транспорта имени М.И. Калинина (г. Днепро-
— петровск, Университетская, 2).
— рассмотреть в библиотеке института.
— _____ 2 июля 1980 г.

— _____ специализированного
— _____ технических наук,
— _____

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Решение поставленной ХХУ съездом КПСС перед народным хозяйством задачи по дальнейшему увеличению пассажирооборота связано прежде всего с увеличением скоростей движения железнодорожного транспорта, на долю которого приходится 40% пассажирских перевозок в стране. Организация высокоскоростного движения при условии обеспечения его безопасности, комфорта пассажиров, допустимого воздействия на путь обуславливает необходимость совершенствования существующих и создания новых типов железнодорожных экипажей. Для оценки и прогнозирования их динамических качеств требуется дальнейшее развитие методов исследования колебаний и взаимодействия подвижного состава и пути.

6905а
Цель работы является отработка методики исследования пространственных колебаний пассажирских экипажей, предназначенных для высоких скоростей движения, исследование собственных и вынужденных колебаний вагонов при раздельном, а также совместном действии вертикальных и горизонтальных возмущений.

Методика исследования. В работе использован метод математического моделирования с применением цифровых вычислительных машин. Численное интегрирование нелинейных дифференциальных уравнений совместных колебаний экипажа и железнодорожного пути проводилось методом Адамса-Башфорта. Устойчивость возмущенного движения экипажа исследовалась по первому приближению Ляпунова.

Научная новизна. Построена математическая модель совместных пространственных колебаний вагона с двойным рессорным подвешиванием и железнодорожного пути, имеющего геометрические несовершенства. Инерционные, диссипативные и упругие свойства пути учтены как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях.

Днепропетровский
институт инженеров
жел. дор. транспорта
им. М. И. Калинина
БИБЛИОТЕКА
Основной отдел

При вертикальных перемещениях колес относительно рельсов принята во внимание нелинейная связь, учитывающая изменение радиуса кривизны катания колеса вследствие криволинейности формы профиля поверхности катания.

Исследование вынужденных колебаний проводилось как при раздельном, так и одновременном действии возмущений в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Проведено сопоставление результатов, полученных с использованием плоских и пространственных расчетных схем. Оценено взаимное влияние вертикальных и горизонтальных колебаний.

Изучено влияние параметров подрельсового основания на устойчивость движения скоростного подвижного состава и его взаимодействие с железнодорожным путем.

Практическая ценность и внедрение результатов работы. Реферируемая диссертация является частью работ по развитию методов исследования динамики подвижного состава и направлена на обоснование расчетных схем, применяемых при решении задач о вынужденных колебаниях скоростных экипажей. Полученные результаты позволяют рекомендовать те расчетные схемы, на основании которых можно получать с достаточной точностью оценки динамических качеств железнодорожных экипажей.

Методика, предложенная в работе, используется в Калининском филиале ВНИИ вагоностроения при создании перспективных тележек для пассажирских вагонов, а также в Днепропетровском отделении Института механики АН УССР и Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта при проведении теоретических исследований колебаний транспортных экипажей.

Апробация. Основные результаты работы доложены на Всесоюзной конференции по механике наземного транспорта (Днепропетровск, 1977), Юбилейной сессии Днепропетровского научного центра

АН УССР, посвященной 60-летию Великого Октября (Днепропетровск, 1977), Восстановленной научно-технической конференции по борьбе с шумом и вибрацией на железнодорожном транспорте (Ленинград, 1977), научном семинаре "Общая механика" (Днепропетровск, 1978, 1980), научном семинаре "Моделирование возмущений в задачах проектирования подвижного состава" (Брянск, 1979).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 печатных работ.

Структура работы обуславлена необходимостью последовательно изложения выбора расчетной схемы, построения математической модели, методов решения, проведенных исследований устойчивости движения, собственных и вынужденных колебаний системы при различных параметрах подрельсового основания и возмущающих воздействий, результатов сопоставления теоретических и экспериментальных данных.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и выводов. Она содержит 164 страницы текста, 53 рисунка, 6 таблиц, список литературы из 105 наименований и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Теоретические основы исследования динамики подвижного состава заложены в работах отечественных и зарубежных ученых:

Н.П.Петрова, С.П.Тимошенко, Н.Е.Жуковского, А.М.Гонимского - Цвирко, М.В.Винокурова, М.Ф.Вериге, С.В.Вершинского, В.А.Лазаряна, В.Б.Медела, Ф.Картера, Г.Марье.

Значительный вклад в изучение динамических качеств рельсовых

экипажей и процессов их взаимодействия с железнодорожным путем внесли: Г.П.Бурчак, Л.О.Гречева, А.А.Камеев, А.Я.Коган, М.Л.Коротенко, О.М.Куценко, А.А.Львов, А.Н.Савоськин, Т.А.Тибиллов, В.Ф.Ушкалов, М.А.Фришман, И.И.Челноков, Г.М.Шахуняц, М.А.Долейниш, Т.Мацудайра, А.де Патер, Дж.Рокар, А.Уиккенс и другие.

Всесторонние теоретические и экспериментальные работы по динамике и прочности подвижного состава, выбору рациональных конструкций экипажей, совершенствованию методов расчета проводятся в ЦНИИ МПС, ВНИИвагоостроения, ДОИМ АН УССР, ДИИТе, ЛИИЖТе, МИИТе, ХПИ, БИТМе и КБ ведущих заводов транспортного машиностроения.

Необходимым условием обеспечения удовлетворительных динамических качеств железнодорожного экипажа, как показывают многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, является асимптотическая устойчивость его невозмущенного движения. Однако большинство современных железнодорожных вагонов обладает низкими критическими скоростями. Поэтому их движение может сопровождаться интенсивными автоколебаниями, обуславливающими совместно с вынужденными колебаниями существенные воздействия со стороны подвижного состава на путь.

При теоретических исследованиях динамических качеств экипажей обычно рассматривают отдельно колебания вагона в продольной вертикальной плоскости симметрии и боковые колебания. В первом случае исключаются горизонтальные колебания и боковая качка, которая может оказывать существенное влияние на величины вертикальных сил; во втором - невозможно оценить вертикальные силы в системе. Кроме того, в зоне неустойчивого и малом движения, когда точка контакта колес и рельсов могут находиться на нелинейной части профиля поверхности катания, рассматриваемая система теряет симметрию. Исследование колебаний экипажа и пути отдельно в вертикальной и горизонтальной плоскостях в этом случае являет-

он некорректным и может привести к неправильным оценкам.

Решение задачи в пространственной постановке позволяет получать значения динамических характеристик, приближающиеся к реальным, а также дает возможность оценить погрешности вносимые раздельным рассмотрением боковых и вертикальных колебаний. В реферируемой работе на примере современных отечественных рельсовых экипажей (о скоростного вагона-лаборатории СВЛ, пассажирского вагона с тележками КВЗ-ЦНИИ, моторного вагона электропоезда ЭР-200, вагона поезда РТ-200) исследуются пространственные колебания подвижного состава, предназначенного для высоких скоростей движения.

В первой главе диссертации дано обоснование выбора расчетной схемы и построена математическая модель системы "экипаж-путь".

Для обеспечения требуемой надежности результатов рассмотривалась расчетная схема, состоящая из трех частей: экипажа, деформируемого пути и деформируемого подрельсового основания.

Подобие систем рессорного подвешивания исследуемых экипажей позволяет использовать для них одну расчетную схему, включающую девять твердых тел (кузов, надрессорные балки, рамы тележек, колесные пары), соединенных упруго-диссипативными элементами. При значимых угловых перемещениях кузова и тележек в горизонтальной плоскости (в упругих скользунах) возникает момент сил сухого трения. Элементы в связях рамы тележки с надрессорными балками - упруго-вязкие, а с колесными парами - упруго-диссипативные: в вертикальном направлении рассматривались демпферы как вязкого, так и кулонова трения. Профиль поверхности катания колес - валикоидный.

При выборе расчетной схемы пути приняты следующие допущения:

I. Путь представлен в виде двух балок, лежащих на сплошном упру-

го-вязком инерционном (по В.З.Власову) основании и находящимся под действием вертикальных и горизонтальных сил, которые приложены в точках контакта колес и рельсов и движутся с постоянной скоростью v вдоль оси балок.

2. Нагрузка на основание от каждой рельсовой нити равномерно распределена в пределах половины длины шпалы.
3. Нагрузка, действующая на одну из рельсовых нитей не влияет на перемещения другой.
4. Вертикальные и горизонтальные поперечные перемещения рельсов равны соответствующим перемещениям основания в точке контакта, а горизонтальные продольные перемещения рельсов и основания отсутствуют.
5. Перемещениями основания за пределами шпалы и кручением рельсов пренебрегаем.

Допущения 2+5 введены по результатам анализа численных значений коэффициентов уравнений колебаний рельсо-шпальной решетки на упругом власовском основании. Использование модели основания в трактовке В.З.Власова позволяет выразить перемещения произвольных точек основания через перемещения точек его поверхности.

Получены и решены уравнения совместных пространственных колебаний рельса и подрельсового основания. Вследствие принятых допущений, уравнения колебаний рельса в вертикальной и горизонтальной плоскостях имеют одинаковую структуру и не связаны между собой. Полученные на основании решения этих уравнений функции распределения перемещений рельса в обоих направлениях описываются зависимостью

$$F_s(x) = e^{-\alpha_s x} (\cos \beta_s x + \frac{\alpha_s}{\beta_s} \sin \beta_s x), \quad (s = z, y), \quad (I)$$

где α_s и β_s - коэффициенты, характеризующие соответственно окорость затухания и длину волны. функции F_s являются быстро затухающими, поэтому при определении перемещений пути от всех сил, действующих на рельсы со стороны экипажа, прогибы балки под одной тележкой, вызываемые давлением колес другой тележки, не принимаются во внимание. В результате применения известной гипотезы Шехунянца о подобии упругих линий балки, лежащей на основании, при действии движущейся переменной нагрузки и численно равной ей в любой момент времени подвижной постоянной нагрузки удается выразить перемещения всех точек балки и основания через перемещения рельсов в точках контакта с колесом.

Для исследования совместных колебаний экипажа и железнодорожного пути записаны уравнения связей между перемещениями колес и рельсов

$$z_{pij} = z_{ij} + \Delta r_{ij} - \eta_{ij}, \quad (2)$$

где z_{pij} , z_{ij} - вертикальные перемещения соответственно рельса и j -го колеса i -ой колесной пары в точке контакта; η_{ij} - текущее значение ординаты вертикальной неровности пути.

Ввиду нелинейности профиля поверхности катания приращение радиуса круга катания Δr_{ij} является функцией горизонтального поперечного смещения точки касания колеса и рельса Δy_{ij}

$$\Delta r_{ij} = (-1)^j (\mu_s \Delta y_{ij} + a_1 [(-1)^j \Delta y_{ij} - \delta]^2 \sigma_s [(-1)^j \Delta y_{ij} - \delta]).$$

Здесь μ_s - коничность линейного участка профиля поверхности катания колеса; δ - зазор между колесом и рельсом; $\sigma_s(\Delta y_{ij})$ - единичная функция; a_1 - коэффициент, численное значение которого выбирается из условия наилучшего совпадения нелинейного участка профиля поверхности катания с аппроксимирующей его кривой;

$$\Delta y_i = y_i - r\theta_i - y_{pi} - \eta_{pi} ,$$

где y_i , y_{pi} - горизонтальные перемещения соответственно центра масс i -ой колесной пары и рельса в точке контакта с j -ым колесом ; θ_i - угол поворота i -ой колесной пары относительно продольной оси x ; η_{pi} - текущее значение горизонтальной неровности пути ; r - средний радиус круга катания колеса.

Вынужденные колебания экипажа вызваны геометрическими несовершенствами железнодорожного пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях. В качестве вертикальных приняты неровности от стыковых соединений рельсовых звеньев, которые моделируются периодически повторяющимися импульсами косинусоидальной формы

$$\eta_z = \frac{d_z}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{\lambda_z} \right) \left[\sigma_z(x) - \sigma_z(x - \lambda_z) \right] , \quad 0 < x < L , \quad (3)$$

здесь λ_z - длина, d_z - глубина неровности; L - длина рельса.

Горизонтальные возмущения, обусловленные конечной длиной рельсового звена и известным движением экипажа, представлены формулой

$$\eta_r = d_r \sin \frac{2\pi x}{\lambda_r} , \quad (4)$$

где d_r - амплитуда, λ_r - длина волны неровности.

Дифференциальные уравнения колебаний системы "экипаж-путь" составлены как уравнения Лагранжа II рода. В качестве обобщенных координат приняты величины, соответствующие поступательным и угловым перемещениям твердых тел системы.

Математическая модель пространственных колебаний экипажа и пути представляет собой систему 39 нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, которая в матричной форме имеет

следующий вид:

$$\ddot{\vec{q}} - M'(\vec{q}) \vec{P}(\vec{q}, \dot{\vec{q}}, \ddot{\vec{q}}), \quad (5)$$

где $\vec{q}$ - вектор обобщенных координат системы (размерностью $n=39$),

$M'(\vec{q})$ - обратная матрица инерционных коэффициентов;

$\vec{P}$ - вектор правых частей.

Некоторые инерционные, диссипативные и квазиупругие коэффициенты системы (5) вследствие учета связи между вертикальными и горизонтальными перемещениями колес и рельсов (2) являются функциями обобщенных координат.

Вторая глава посвящена обработке методики исследования пространственных колебаний системы "экипаж-путь". На примере скоростного вагона-лаборатории осуществлена проверка правильности полученной математической модели. Путем задания специальных режимов, при которых пространственные колебания системы близки к плоским, получено достаточно хорошее совпадение результатов с найденными ранее при использовании плоских расчетных схем.

Далее, на основании анализа собственных чисел матрицы коэффициентов уравнений движения линеаризованной системы (40 порядка) исследована устойчивость невозмущенного движения экипажа. Построены зависимости вещественных и мнимых составляющих корней с наибольшими вещественными частями от скорости движения для различных коэффициентов эквивалентного вязкого трения и упругих скользучах.

В результате решения системы (5), включаящей существенные нелинейности (упруго-фрикционные элементы в связях кузова и рам тележек, нелинейность профиля поверхности катания колес), при $\eta_r - \eta_s = 0$ получены стационарные режимы колебаний. Показано, что в зависимости от начальных условий в системе "экипаж-путь"

(для скоростей движения больших критической $v_{кр}$) имеет место несколько режимов установившихся колебаний: а) без выбора зазора в рельсовой колее; б) с выбором зазора при горизонтальных перемещениях колесных пар одной из тележек; в) с выбором зазора при горизонтальных перемещениях колесных пар обеих тележек. Установлено, что в последнем случае в системе возникают наибольшие по величине усилия. Значения координат и их производных в фиксированный момент времени, соответствующие этому режиму, используются в дальнейшем в качестве начальных условий при изучении вынужденных колебаний экипажей.

Исследована возможность упрощения математической модели пространственных колебаний экипажа и пути. Предварительная оценка, полученная из рассмотрения коэффициентов дифференциальных уравнений, подтверждена затем анализом вынужденных колебаний экипажа. Установлено, что влияние давлений соседних колесных пар тележки при определении сил и перемещений в системе "экипаж-путь" мало и его можно не учитывать. Это позволило сократить время счета задачи примерно на 25%.

В третьей главе реферируемой работы рассматривается влияние параметров подрельсового основания на результаты решения задачи. Расчетные значения модуля упругости основания (E_0) и коэффициентов затухания перемещений по глубине основания (γ_z) выбирались из условия их соответствия экспериментальным данным о вертикальной ($S-z$) и горизонтальной ($S-y$) жесткостях пути.

По результатам анализа коэффициентов дифференциальных уравнений движения (5) установлено, что изменение параметров E_0 от 1000 до 5000 $\text{Тн}\cdot\text{м}^{-2}$ и γ_z, γ_y от 1 до 3 м^{-1} приводит к существенному уменьшению величин инерционных коэффициентов пути и к возрастанию коэффициентов, характеризующих упругие свойства пути, скорость затухания и длину волны функций распределения вертикаль-

ных (α_z, β_z) и горизонтальных (α_y, β_y) перемещений рельсов (I).

Изучено влияние параметров основания на динамические характеристики системы "экипаж-путь". Результаты исследования устойчивости СМ показали, что изменение параметров E_0, γ_z, γ_y незначительно сказывается на характере колебаний системы. В частности, увеличение модуля упругости E_0 в 5 раз (с 1000 Тм^{-2} до 5000 Тм^{-2}) приводит к росту критической скорости экипажа всего на 5 км/ч и уменьшению длины волны автоколебаний (в области неустойчивого в малом невозмущенного движения) на 0,21 м. Из анализа собственных и вынужденных колебаний скоростного вагона-лаборатории следует, что от параметров подрельсового основания наиболее существенно зависят вертикальные усилия в точках контакта колес и рельсов, а также в буксовой ступени подвешивания. Изменение E_0 от 1000 до 5000 Тм^{-2} и γ_z, γ_y от 1 до 3 м^{-1} (для $v=200 \text{ км/ч}$) вызывает увеличение указанных сил соответственно на 200 ; 50 и 20%. Отличия в величинах горизонтальных сил, соответствующих граничным значениям варьируемых параметров, не превышают 23%.

Проведена оценка влияния инерционных свойств подрельсового основания на результаты решения задачи. Установлено, что учет инерции основания при высокой скорости движения СМ ($v=200 \text{ км/ч}$) приводит к существенному уменьшению значений вертикальных сил взаимодействия экипажа и пути, а также усилий в буксовой ступени подвешивания (до 45%) по сравнению с вариантом, в котором принимались во внимание инерционные свойства лишь верхнего строения пути. Горизонтальные силы при этом изменяются не более, чем на 10%.

Четвертая глава посвящена исследованию связности вертикальных и горизонтальных колебаний скоростных пассажирских экипажей при движении как по идеально гладкому пути, так и по пути с геометрическими несовершенствами. Оценка ходовых качеств вагона

проводилась по максимальным величинам динамических составляющих сил взаимодействия и усилий в рессорном подвешивании.

Результаты анализа собственных колебаний скоростного вагона-лаборатории показали, что при переходе в область неустойчивого в малом движения имеет место резкое нарастание максимальных значений усилий и обобщенных координат. Проведено сравнение решений системы (5) для $\eta_r - \eta_b = 0$ при учете в уравнениях связи (2) приращения радиусов кругов катания колес ($\Delta r_{\text{к}}$) и без его учета. В последнем случае боковые колебания вагона отделяются от колебаний в вертикальной продольной плоскости симметрии (вертикальные составляющие усилий в установившемся режиме определяются только боковой качкой кузова и тележек). Показано, что учет $\Delta r_{\text{к}}$ в уравнениях (2) приводит к существенному возрастанию амплитуд боковой качки тележек при скоростях движения, превышающих критическую, что оказывается на величинах вертикальных сил в системе "экипаж-путь". Горизонтальные усилия при обоих способах задания связи (2) практически одинаковы.

Далее рассмотрены пространственные колебания пассажирских экипажей (СВЛ, пассажирского вагона, вагона поезда РТ-200), вызываемые действием вертикальных возмущений, симметрично расположенных по обоим рельсовым нитям ($\Delta_r = 5 \text{ мм}$; $\lambda_r = 3 \text{ м}$). Расстояние между неровностями принималось постоянным, равным длине рельсового звена ($L = 25 \text{ м}$). Установлено, что в случае движения экипажа со скоростью, меньшей критической, динамические характеристики системы определяются колебаниями, обусловленными только действием возмущений. В области неустойчивого в малом движения усилия в системе зависят от характера взаимодействия колебаний, возникающих от действия неровностей, и автоколебаний в горизонтальной плоскости. Изменение усилий при движении экипажа от неровности к неровности зависит от соотношения периодов следования возмуще-

ний и извилистого движения вагона.

Выполнено сравнение результатов решений, полученных с использованием плоской и пространственной расчетных схем. Установлено, что вертикальные усилия, определенные с помощью разных расчетных схем, практически одинаковы в области асимптотически устойчивого движения и могут существенно отличаться в случаях, когда скорость экипажа превышает критическую. Например, при скорости движения СВЛ 200 км/ч ($v_{кр} = 145$ км/ч) вертикальные силы, соответствующие пространственной расчетной схеме, больше сил, полученных с использованием плоской схемы, в буксовой ступени подвешивания в 1,2 раза, в точках контакта колес и рельсов - в 1,5 раза, в центральной ступени подвешивания почти в 2 раза. Показано, что для случаев, когда в вертикальной плоскости отсутствуют элементы с нелинейными характеристиками, наибольшие значения вертикальных сил в системе "экипаж-путь" можно определить путем суммирования соответствующих сил, полученных по плоской расчетной схеме с их величинами в режиме автоколебаний. Разница в максимальных значениях горизонтальных сил при наличии и отсутствии вертикальных симметричных возмущений в рассматриваемом диапазоне скоростей не превышает 15%.

Проведен также анализ реакции рассматриваемой системы на горизонтальные возмущения, поступающие со стороны пути. Построенные зависимости амплитудных значений усилий в системе "экипаж-путь" от длины волны (10-25 м) геометрической неровности пути в плане ($d_p = 2,5$ мм) для скоростей движения СВЛ 100, 150, 175, 200 км/ч показывают, что характер изменения вертикальных и горизонтальных усилий аналогичен. Наибольшие значения сил наблюдаются, как правило, при резонансе длины волны возмущающего воздействия и извилистого движения экипажа. Профили зависимости максимальных значений горизонтальных перемещений точки контакта колес

с рельсами от длины волны ($10+25$ м) и амплитуды ($2+6$ мм) неровности свидетельствуют о том, что контакт гребня колеса с рельсом может осуществляться не только при $v > v_{кр}$, но и в области асимптотически устойчивого движения экипажа. В этом случае в системе возникают значительные величины горизонтальных и вертикальных усилий.

Одним из нормируемых критериев динамических качеств вагонов является показатель плавности хода, определяемый в работе в соответствии с типовой методикой по формуле $W_z = (q_{mz} \sigma_{mz})^{0,3}$ где σ_{mz} - среднеквадратическое значение процесса вертикальных ($z-z$) или горизонтальных ($y-y$) ускорений на выходе "физиологического фильтра", на вход которого подаются ускорения кузона в исследуемых сечениях; $q_{mz} = 1,34$; $q_{my} = 1,71$ - постоянные множители. Сравнительный анализ динамических качеств, проведенный для СВЛ в режиме автоколебаний и при действии возмущений в горизонтальной плоскости для различных скоростей, показывает, что в тех случаях, когда движение вагона происходит с выбором зазора в рельсовой колее, показатель плавности хода резко ухудшается как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях.

Проведено исследование вынужденных колебаний скоростного вагона-лаборатории, пассажирского вагона, вагона поезда РТ-200 и вагона электропоезда ЭР-200 при одновременном действии возмущений в вертикальной и горизонтальной плоскостях. В качестве горизонтальных рассматривались неровности с длиной волны, равной длине рельсового звена ($\lambda_r = 25$ м) или длине волны извилистого движения исследуемого экипажа. Выполнено сравнение усилий, возникающих в системе "экипаж-путь" при раздельном и совместном действии возмущений в обеих плоскостях. Учет горизонтальных неровностей в дополнение к вертикальным приводит к возрастанию вертикальных сил, причем более заметно при действии горизонтальных

возмущений с длиной волны автоколебаний системы. Существенное их увеличение (в некоторых случаях почти в 1,5 раза) наблюдается в элементах центральной ступени подвешивания (особенно при $v < v_{кр}$ вследствие возбуждения боковой качки кузова со значительными амплитудами) и в точках контакта колес и рельсов. Горизонтальные силы при учете вертикальных неровностей в дополнение к горизонтальным изменяются не более, чем на 25%.

Для проверки применяемой методики исследования пространственных колебаний экипажа сопоставлены расчетные и экспериментальные данные второго этапа натурных испытаний скоростного вагона лаборатории, проведенных на Приднепровской железной дороге в 1972-1973 гг. Сопоставлялись величины динамических составляющих, возникающих в элементах буксовой ступени подвешивания.

Результаты сравнения теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют о достаточно хорошем их совпадении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. Построена математическая модель, описывающая совместные пространственные колебания пассажирского экипажа и инерционного упруго-вязкого пути с геометрическими несовершенствами.

2. Из анализа собственных колебаний скоростных экипажей следует, что при переходе из зоны асимптотической устойчивости в зону неустойчивого малом движении вагона влияние связи между вертикальными и горизонтальными колебаниями резко возрастает. Учет связи в этом случае приводит к увеличению амплитуд боковой качки тележек, что обуславливает рост вертикальных сил в системе.

3. Исследование вынужденных колебаний экипажей, движущихся по пути с вертикальными симметричными стыковыми неровностями, по-

69059

казало:

- при скорости движения экипажа, меньшей критической, силы в системе, определенные с использованием плоской и пространственной расчетных схем, мало отличаются между собой;
- в случае неустойчивого и малом движении вагона вертикальные усилия в системе зависят от характера взаимодействия колебаний, вызванных действием возмущений, и автоколебаний в горизонтальной плоскости;
- действие симметричных вертикальных откидных возмущений на величины горизонтальных сил не оказывает существенного влияния.

4. На основании результатов исследования колебаний экипажа, вызванных действием горизонтальных неровностей, можно заключить следующее:

- в зависимости от длины волны и амплитуды горизонтальных возмущений в системе могут возникать значительные величины как горизонтальных, так и вертикальных усилий;
- небольшие усилия (для постоянной амплитуды возмущения и скорости движения), как правило, имеют место при совпадении длины волны неровности и извилистого движения экипажа;
- показатели плавности хода вагона как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях существенно зависят от устойчивости движения и при $v > v_{кр}$ могут превышать допустимые значения.

5. Проведено сравнение результатов реакции системы на раздельное и одновременное действие возмущений в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Показано, что в последнем случае наблюдается рост вертикальных усилий (особенно при выборе вагона в рельсовой колее для $v < v_{кр}$) в центральной ступени подвешивания, а также сил в точках контакта колес и рельсов. Изме-

нием горизонтальных сил в рассматриваемом диапазоне скоростей не превышает 25%.

Таким образом, горизонтальные колебания можно исследовать независимо от вертикальных (при условии, что вертикальные возмущения симметричны по обеим рельсовым нитям). Колебания в вертикальной продольной плоскости симметрии можно рассматривать отдельно от боковых только в том случае, когда амплитуды бокового относ. колесных пар не превышают зазора в рельсовой колее.

6. Измерение параметров основания, в частности модуля упругости и коэффициентов затухания перемещений по глубине основания, может существенно влиять на выходные характеристики системы "экипаж-путь", но мало оказывается на величинах критической скорости и длины волны извилистого движения экипажа (при $\sigma > v_{кр}$). Учет инерционных свойств подрельсового основания при высокой скорости движения вагона приводит к уменьшению расчетных значений вертикальных сил взаимодействия, а также усилий в буксовых ступенях подвешивания по сравнению с вариантом, в котором учитывается инерция лишь верхнего строения пути.

7. Сравнение опытных и расчетных данных, полученных для скоростного вагона-лаборатории, позволяет утверждать, что предложенная в работе методика исследования пространственных колебаний экипажа обеспечивает получение достаточно полной информации о величинах усилий в системе и может быть использована для прогнозирования динамических качеств экипажа, предназначенных для высоких скоростей движения.

Основное содержание опубликовано в следующих работах автора:

I. Определение сил взаимодействия движущегося объекта и инерцион-

- ного пути. - "Нагруженность, колебания и прочность сложных механических систем". Киев, "Наукова думка", 1977, с.93-99 (соавторы В.Д.Данович, И.А.Летвин, Е.Ю.Трубицкая).
2. Исследование вынужденных колебаний в системе "экипаж-путь" с учетом инерционных свойств подрельсового основания. - Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Борьба с шумом и вибрацией на железнодорожном транспорте", Ленинград, 1977, с.93-94 (соавторы В.А.Лазарян, Л.А.Гальченко, В.Д.Данович, А.И.Залесский, В.С.Ивков, В.Ф.Гречев, Е.Ю.Трубицкая).
3. Исследование пространственных колебаний пассажирского вагона. - "Динамика и прочность сложных механических систем". Киев, "Наукова думка", 1978, с.52-59 (соавторы В.Д.Данович, Е.Ю.Трубицкая).
4. Исследование пространственных колебаний пассажирского вагона движущегося по пути с вертикальными и горизонтальными неровностями. - Тр.ДНУТ, вып. 205/26, Днепропетровск, 1979, с.76-82 (соавторы В.Д.Данович, Е.Ю.Трубицкая).
5. О силах в системе "экипаж-путь" при скоростях движения выше критической. - "Колебания, прочность и устойчивость сложных механических систем". Киев, "Наукова думка", 1979, с.141-145.

МОКРИЙ Татьяна Федоровна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СКОРОСТНЫХ
ПАССАЖИРСКИХ ЭКИПАЖЕЙ

(05.22.07 – подвижной состав и тяга поездов)

Подписано к печати 24.04.1980г. БТ 62297

Формат бумаги 60х84/16. Бумага для множительных аппаратов.
Ротапринт. Усл.печ.л. 1,22. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 100 экз.
Заказ № III4. Бесплатно.

Участок оперативной полиграфии
редакционно-издательского отдела ДИИТа.

320629, ГСП, Днепропетровск, 10, ул. Университетская, 2.

Сканировала Камянская Н.А.