

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР  
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА имени М. И. КАЛИНИНА

---

*На правах рукописи*

ЗИНЧЕНКО Виктор Иванович

625.1.03

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ ЭКИПАЖЕЙ ПО КРИВОЛИНЕЙНЫМ УЧАСТКАМ ПУТИ

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  
1977

НТБ  
ДНУЖТ

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

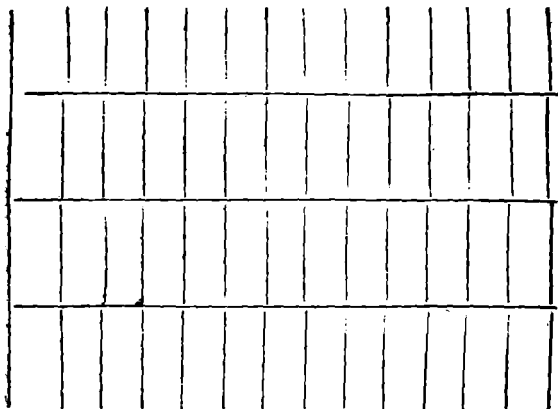
Научный руководитель:  
заслуженный деятель науки УССР, академик АН УССР, доктор  
технических наук, профессор **В. А. Лазарян**.

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор **С. М. Куценко**,  
доктор технических наук, и. о. профессора **М. Л. Коротенко**.

я.

И в Дне-  
а имени  
ерситет-

совета  
етрович.



НТБ  
ДНУЖТ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Важнейшей проблемой, стоящей перед железнодорожным транспортом, является повышение скоростей движения поездов. Наличие криволинейных участков пути усложняет решение этой проблемы. Высокоскоростное движение рельсовых экипажей по кривым ограничено не только боковым воздействием на путь, но и величиной поперечного ускорения, возможностью обезгруживания колёс и схода их с рельсов. В переходных кривых скорость движения экипажей ограничивается ещё и величиной скорости изменения поперечного ускорения. Поэтому вопросы, связанные с исследованием криволинейного движения рельсовых экипажей, имеют очень важное значение.

Для реализации высокоскоростного движения необходимо совершенствовать и создавать новые конструкции рельсовых экипажей, а для этого нужно иметь надёжные методики исследований динамических качеств подвижного состава как на прямолинейных, так и криволинейных участках пути.

Цель работы. Разработка методик исследования собственных и вынужденных колебаний рельсовых экипажей при движении по криволинейным участкам пути произвольного очертания в плане, стационарных режимов и устойчивости движения экипажей в круговых кривых. Оценка динамических качеств некоторых типов экипажей существующих и перспективных конструкций.

Методика исследования. Исследования криволинейного движения рельсовых экипажей проводились с помощью ЭПМ. При исследовании собственных и вынужденных колебаний экипажей интегрирование дифференциальных уравнений, описывающих их движение, осуществлялось методом Адамса-Винфорта. Стационарные режимы соответствующие невозмущённому движению рельсовых экипажей по круговым кривым, опре-

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

1207

делались из решения нелинейных алгебраических уравнений, полученных из дифференциальных уравнений движения. Решение алгебраических уравнений проводилось итерационным методом (метод Стефенсона). Устойчивость невозмущенного криволинейного движения рельсовых экипажей исследовалась по первому приближению А.М. Ляпунова. При этом собственные числа матриц коэффициентов уравнений возмущенного движения определялись с помощью  $QR$  - алгоритма. Полученные результаты теоретических исследований сопоставлялись с экспериментальными данными.

Научная новизна. Предложена математическая модель движения рельсового экипажа, позволяющая исследовать его собственные и вынужденные пространственные колебания на криволинейных участках пути произвольного очертания в плане. Разработана методика исследования стационарных режимов и устойчивости движения рельсовых экипажей в круговых кривых.

Пути практической реализации. Разработанные методики исследования вынужденных колебаний, стационарных режимов и устойчивости движения рельсовых экипажей в криволинейных участках пути использованы при выполнении совместной работы с НИИ вагоностроения по проблеме создания системы принудительного наклона кузова вагона в кривых. По результатам выполненных исследований предложены рекомендации, принятые НИИ вагоностроения для разработки конструктивных схем макетного образца с наклоняемым кузовом.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на юбилейной научно-технической конференции ДИИТа (Днепропетровск, 1974), на научно-техническом совещании по скоростному наземному транспорту (Днепропетровск, 1974), на семинарах по механике Днепропетровского отделения Института механики АН

УССР и Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта имени И.И.Калинина (Днепропетровск, 1975), на семинаре "Общая механика" (Днепропетровск, 1976).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано шесть работ.

Структура диссертационной работы обусловлена необходимостью последовательного описания разработанных методик, построенных математических моделей, проведенной оценки динамических качеств некоторых типов рельсовых экипажей существующих и перспективных конструкций, результатов сопоставления теоретических и экспериментальных данных.

Объём работы. Диссертация изложена на 152 страницах; состоит из введения, пяти глав и заключения; содержит 50 рисунков и 5 таблиц, список литературы, включающий 104 наименования.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Состояние вопроса и постановка задачи. Вопросы исследования движения рельсовых экипажей в кривых изложены в работах известных отечественных и зарубежных учёных: С.Н.Смирнова, А.А.Холодецкого, К.Ю.Цеглинского, К.П.Королёва, С.М.Хуценко, В.Б.Меделя, О.П.Ершкова, Т.А.Тибилова, А.В.Славынского, С.М. Андрияшского, А.А.Камаева, Г.Марье, Х.Хеймана и других.

Следует отметить, что динамическому вписыванию железнодорожных экипажей в кривые участки пути посвящено значительное количество работ, тогда как исследования их вынужденных колебаний при движении по кривым освещены в литературе гораздо меньше, а устойчивость криволинейного движения рельсовых экипажей практически не рассматривалась.

В настоящей работе изложены вопросы, связанные с исследова-

нием криволинейного движения некоторых типов экипажей существующих и перспективных конструкций.

В первой главе приведена общая методика составления дифференциальных уравнений, описывающих движение рельсовых экипажей по криволинейным участкам пути произвольного очертания в плане. При этом экипажи рассматриваются как системы твёрдых тел (кузов экипажа, обресооренные и необресооренные части тележки), соединённых упругими и диссипативными элементами. Для описания движения рельсового экипажа в кривой кроме основной (инерциальной) системы отсчёта для каждого твёрдого тела введены две подвижные системы координат: естественная и неизменно связанная с твёрдым телом. Положение естественной системы координат по отношению к неподвижной системе координат определяется дуговой координатой  $s$ , углом  $\alpha$  между касательной к оси пути и осью неподвижной системы координат, углом наклона  $\theta_k$  плоскости пути вследствие возвышения  $h$  наружного рельса. Параметры  $\alpha$  и  $\theta_k$  определяются формой и длиной переходной или круговой кривой. Положение твёрдого тела относительно естественной системы координат описывается линейными перемещениями  $y$ ,  $z$  и углами продольной качки  $\varphi$ , виляния  $\psi$ , боковой качки  $\theta$ . Начало связанной системы координат совмещено с центром масс. Координатные оси связанной системы являются главными центральными. Положение связанной с твёрдым телом системы координат по отношению к неподвижной системе в произвольный момент времени определяется тремя линейными координатами  $\xi_c$ ,  $\eta_c$ ,  $\zeta_c$  начала связанной системы координат и тремя угловыми координатами - самолётными углами:  $\tilde{\varphi} = \varphi + \alpha$  - рысканья,  $\tilde{\psi} = \psi$  - тангаж и  $\tilde{\theta} = \theta + \theta_k$  - крена.

Для составления уравнений движения используются уравнения Лагранжа второго рода. Кинетическая энергия  $T$  определяется по теореме Кеннига и представляет собой кинетическую энергию твёрдого тела в переносном поступательном движении и в сферическом движении относительно центра масс:

$$T = \frac{1}{2} [m(\dot{\xi}_c^2 + \dot{\eta}_c^2 + \dot{\zeta}_c^2) + J_x \omega_x^2 + J_y \omega_y^2 + J_z \omega_z^2],$$

где  $\dot{\xi}_c, \dot{\eta}_c, \dot{\zeta}_c$  - проекции скорости движения центра масс твёрдого тела на оси неподвижной системы координат;  $m, J_x, J_y, J_z$  - масса и главные центральные моменты инерции;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  - проекции вектора угловой скорости вращения на оси связанной системы координат, определяемые из следующих выражений:

$$\begin{aligned}\omega_x &= \dot{\theta} - \dot{\varphi} \sin \varphi, \\ \omega_y &= \dot{\varphi} \cos \theta + \dot{\psi} \cos \varphi \sin \theta, \\ \omega_z &= \dot{\psi} \cos \varphi \cos \theta - \dot{\varphi} \sin \theta.\end{aligned}$$

Потенциальная энергия системы вычисляется как алгебраическая сумма величины изменения энергии вследствие подъёма или опускания центров масс кузова и тележек и величины энергии упругих деформаций элементов рессорного подвешивания, определяемой по теореме Клапейрона.

Считаем, что демпферы установлены параллельно упругим элементам и создают вязкое сопротивление, пропорциональное скорости изменения соответствующего относительного перемещения. Тогда выражение функции рассеяния энергии аналогично выражению потенциальной энергии упругих деформаций.

Обобщённые силы, приложенные к системе, обусловлены взаимодействием колёс с рельсами. При выводе выражений сил взаимодействия поверхность катания колеса принята нелинейной. При этом

предполагалось, что колёса имеют "одноточечный" контакт с рельсами. Касательные силы  $F_n$  взаимодействия колёс с рельсами определены по гипотезе крипа, устанавливающей нелинейную зависимость этих сил от безразмерных характеристик  $\varepsilon_n$  проскальзываний  $n$ -ых колёс каждой тележки ( $n = 1, 2, 3, 4$ ):

$$F_n = -f_1 \varepsilon_n (1 + f_2^2 \varepsilon_n^2)^{-1/2},$$

где  $f_1 = 235 N_n - 24 N_n^2 + N_n^3$ ,  $f_2^2 = \frac{9}{4} f_1^2 (F^*)^{-2}$ ,  $N_n$  - вертикальная нагрузка, действующая на колесо,  $F^*$  - сила кулонова трения. Силы, действующие на колёса в продольном  $X_n$  и поперечном  $Y_n$  направлениях, определены из выражений:

$$X_n = F_n \frac{\varepsilon_{xn}}{\varepsilon_n}, \quad Y_n = F_n \frac{\varepsilon_{yn}}{\varepsilon_n} + W_n,$$

где  $\varepsilon_{xn}$ ,  $\varepsilon_{yn}$  - составляющие безразмерных характеристик проскальзываний колёс в продольном и поперечном направлениях,  $W_n$  - восстанавливающая сила, равная  $W_n = -N_n \operatorname{tg} \theta_n$  ( $\theta_n$  - угол между плоскостью контакта  $n$ -го колёса с рельсом и плоскостью пути).

Вертикальные нагрузки  $N_n$ , действующие на колёса, определены из условия равновесия соответствующей колёсной пары под действием статической нагрузки и дополнительных сил, обусловленных кривизной пути и колебанием обрессоренных частей тележек и кузова. Перераспределение вертикальной нагрузки вследствие поперечных смещений кузова и обрессоренных частей тележек учтено с помощью обобщённых сил:

$$Q_s = m g (y - u), \quad Q_i = m_i g (y_i - u_i),$$

где  $m$ ,  $m_i$  - массы кузова и  $i$ -той тележки;  $u$ ,  $u_i$  - стрелы дуг окружности в пределах базы кузова и  $i$ -ой тележки;  $g$  - ускорение силы тяжести.



Обобщённые силы, обусловленные действием сил сухого трения в местах опирания кузова на надрессорные балки через скользуны, имеют следующие значения:

$$Q_{\psi} = -M_{\text{тр}} \text{sign}(\dot{\psi} - \dot{\psi}_1 + \dot{x} - \dot{x}_1) - M_{\text{тр}} \text{sign}(\dot{\psi} - \dot{\psi}_2 + \dot{x} - \dot{x}_2),$$

$$Q_{\psi_i} = M_{\text{тр}} \text{sign}(\dot{\psi} - \dot{\psi}_i + \dot{x} - \dot{x}_i),$$

где  $M_{\text{тр}}$  - момент сил сухого трения, действующих в горизонтальной плоскости в опорных скользунах.

Во второй главе получена математическая модель движения рельсового экипажа с двойным рессорным подвешиванием по переходным и круговым кривым с учётом геометрических несовершенств пути, позволяющая исследовать собственные и вынужденные пространственные колебания. В качестве примера рассмотрено движение пассажирского вагона с тележками типа КВЗ-ЦНИИ по криволинейному участку пути (прямая, переходная и круговая кривые) с изолированными детерминированными вертикальными стыковыми неровностями и горизонтальной неровностью на круговой кривой. Движение рассматриваемой механической системы относительно естественных систем координат описывается двадцатью тремя независимыми координатами  $q_i$ .

Система дифференциальных уравнений, описывающих криволинейное движение рельсового экипажа, в векторно-матричной форме имеет вид:

$$M\ddot{\bar{q}}_s + (B_1 + B_2)\dot{\bar{q}}_s + (C_1 + C_2)\bar{q}_s + \bar{D} - \bar{Q} = 0, \quad (1)$$

где  $\bar{q}_s$  - вектор обобщённых координат:  $\bar{q}_s = [q_s]'$ ;  $M$ ,  $C_1$ ,  $B_1$  - матрицы инерционных, квазиупругих коэффициентов и коэффициентов вязкого сопротивления;  $B_2$ ,  $C_2$  - матрицы коэффициентов обобщённых гироскопических и центробежных сил вращательного движения;  $\bar{D}$  -

вектор обобщённых центробежных сил поступательного движения;  $\bar{Q}$  - вектор обобщённых сил, обусловленных взаимодействием колёс с рельсами, и сил сухого трения, действующих в местах опирания кузова на боковые скользуны.

Решение уравнений (I) проведено численным интегрированием по методу Адамса-Башфорта на ЭЦВМ "Минск-22М". Как показали исследования, вертикальные неровности оказывают существенное влияние на величины вертикальных сил, действующих на колёса, и величины поперечных сил, передающихся от колёс рельсам, и практически не влияют на величины поперечных сил, действующих на колёсные пары. Горизонтальная неровность оказывает существенное влияние на величины поперечных сил, действующих на колёса и колёсные пары, и не влияет на величины вертикальных сил. Результаты исследований вынужденных колебаний в кривых хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными лабораторией динамики и прочности подвижного состава ДИИТа в 1971 году при поездных испытаниях электровоза ЭС-40 и пассажирского вагона с тележками типа КВЗ-ЦНИИ на участке Белореченская-Майкоп. Различие в максимальных значениях вертикальных и горизонтальных сил, полученных из решения и эксперимента, в среднем не превышает 7%.

В третьей главе рассмотрены собственные колебания рельсовых экипажей при движении по переходным и круговым кривым, а также излагается методика исследования стационарных режимов и устойчивости движения в круговых кривых.

На примере пассажирского вагона с тележками типа КВЗ-ЦНИИ рассмотрены собственные колебания экипажа при движении по криволинейным участкам пути произвольного очертания в плане. На основании проведенных исследований установлено, что вертикальные и

поперечные силы достигают наибольших значений в круговых кривых, а колебания с течением времени затухают. Наибольшее воздействие на рельс оказывает набегающее колесо передней по ходу движения колесной пары.

При исследовании собственных колебаний пассажирского вагона, движущегося по кривой, рассмотрены случаи линейной и нелинейной зависимостей сил псевдоскольжения от безразмерных характеристик проскальзываний колёс. При этом установлено, что в случае линейной зависимости сил псевдоскольжения от проскальзываний величины сил взаимодействия колёс с рельсами значительно превышают максимальное значение физически реализуемой силы кулонова трения. Поэтому исследование движения рельсовых экипажей в кривых нужно проводить с учётом нелинейности сил псевдоскольжения.

Поскольку движение рельсовых экипажей по криволинейным участкам железнодорожного пути описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка, то численное интегрирование таких уравнений нерационально в случае, если требуется получить большое количество решений уравнений для различных вариантов соотношений параметров системы. Поэтому представляет интерес исследовать поведение динамической системы с помощью методов теории устойчивости движения, не прибегая к интегрированию системы уравнений высокого порядка. Для исследования устойчивости движения таких сложных систем, как рельсовые экипажи, наиболее эффективным является использование первого приближения.

При исследовании устойчивости криволинейного движения рельсовых экипажей по первому приближению поперечные перемещения и безразмерные характеристики проскальзывания колёс представлены

в виде :

$$y_n = y_n' + \bar{y}_n, \quad \varepsilon_n = \varepsilon_n' + \bar{\varepsilon}_n, \quad (2)$$

где  $y_n'$  и  $\varepsilon_n'$  - поперечные перемещения и проскальзывания в невозмущённом движении,  $\bar{y}_n$  и  $\bar{\varepsilon}_n$  - в возмущённом движении.

Функции сил псевдоскольжения  $F_n$  и восстанавливающих сил  $W_n$  с учётом выражений (2) разложены в ряды Тейлора соответственно по степеням  $\varepsilon_n$  и  $y_n$ . После отбрасывания нелинейных членов получены следующие выражения:

$$F_n = F_n(\varepsilon_n') - f_n' \bar{\varepsilon}_n, \quad W_n = W_n(y_n') - \kappa_n' \bar{y}_n,$$

где  $f_n'$  - коэффициент псевдоскольжения, зависящий не только от упругих и геометрических характеристик колеса и рельса, но и от кривизны пути,  $\kappa_n'$  - коэффициент гравитационной жёсткости.

В качестве невозмущённого движения рельсового экипажа принято стационарное, то есть такое, при котором позиционные координаты  $q$ , сохраняют постоянное значение, а скорости  $\dot{q}$  и ускорения  $\ddot{q}$  равны нулю. Для определения стационарных режимов движения решена система нелинейных алгебраических уравнений. Эти уравнения получены из уравнений (I) в предположении, что вертикальные и горизонтальные неровности пути отсутствуют, а  $\dot{q}_v$  и  $\ddot{q}_v$  равны нулю. По величинам координат, полученным из решения системы нелинейных алгебраических уравнений, определены поперечные силы, действующие на колёса и колёсные пары, а также величины коэффициентов  $f_n'$  и  $\kappa_n'$  входящих в уравнения возмущённого движения. Оценка характера движения рельсовых экипажей проводилась на основании анализа собственных чисел матриц коэффициентов линеаризованных уравнений возмущённого движения.

Таким образом решение задачи об устойчивости невозмущённого криволинейного движения рельсовых экипажей сведено к опреде-

лению значений координат, характеризующих стационарное движение, и отыскианию собственных чисел матриц коэффициентов линейризованных уравнений возмущённого движения.

По вышеизложенной методике исследованы стационарные режимы и устойчивость движения пассажирского вагона с тележками типа КВЗ-ЦНИИ и моторного вагона электропоезда ЭР-200 по круговым кривым со скоростями  $10 \pm 50$  м/с ( $36 \pm 180$  км/ч). При исследованиях рассмотрено два варианта параметров, характеризующих очертание профиля поверхности катания колеса в зависимости от степени износа. Как показали исследования, при стационарном режиме движения величины поперечных сил, действующих на колёса и колёсные пары, в круговых кривых линейно зависят от непогашенного ускорения  $a_n$ . Очертание профиля поверхности катания колеса, как и кривизна пути, оказывает существенное влияние на величины поперечных сил.

Результаты расчётов показали, что движение рассмотренных экипажей (пассажирского вагона с тележками типа КВЗ-ЦНИИ и моторного вагона электропоезда ЭР-200) в диапазоне скоростей  $v = 10 \pm 35$  м/с ( $36 \pm 126$  км/ч) на кривой  $R = 350$  м ( $h_c = 0,115$  м) и  $v = 10 \pm 50$  м/с ( $36 \pm 180$  км/ч) на кривой  $R = 1000$  м ( $h_c = 0,135$  м) устойчиво, причём запас устойчивости практически одинаков.

В четвёртой главе приведены результаты анализа динамических качеств некоторых типов рельсовых экипажей существующих и перспективных конструкций по оценке поперечных сил, действующих на колёса и колёсные пары, и устойчивости движения рассматриваемых экипажей в круговых кривых. Исследовано влияние параметров рессорного подвешивания на величины сил взаимодействия колёс с рельсами и устойчивость движения пассажирского вагона с тележка-

ми типа КВВ-ЦНИИ и моторного вагона электропоезда ЭР-200.

Как показали исследования, существенное влияние на устойчивость криволинейного движения пассажирского вагона оказывает изменение поперечной жёсткости  $\kappa_{y2}$  элементов центрального подвешивания. Так, с уменьшением  $\kappa_{y2}$  по сравнению с номинальным значением ( $\kappa_{y2} \approx 26 \text{ Тм}^{-1}$ ) запас устойчивости увеличивается, а величины поперечных сил, действующих на набегающее колесо, несколько уменьшаются. Однако при уменьшении  $\kappa_{y2}$ , начиная со значений, равных  $50 \text{ Тм}^{-1}$ , возрастают добавки к вертикальным нагрузкам ( $\Delta N$ ), действующим на колёса, что ухудшает условие устойчивости экипажа против опрокидывания.

Следует отметить, что в круговых кривых движение рельсового экипажа может быть неустойчиво, причём его критическая скорость  $v_{кр}$  (скорость, при которой происходит потеря путевой устойчивости) может оказаться меньшей, чем на прямолинейных участках пути. В качестве примера рассмотрен случай, когда поперечная жёсткость элементов центрального подвешивания равна  $1000 \text{ Тм}^{-1}$ . При этом установлено, что значение  $v_{кр}$  уменьшается с увеличением кривизны пути. Так, например, если при движении вагона по круговым кривым  $R = 1000$  и  $350$  м критическая скорость соответственно равна  $26,5 \text{ м/с}$  ( $95 \text{ км/ч}$ ) и  $24 \text{ м/с}$  ( $86 \text{ км/ч}$ ), то на прямолинейных участках пути  $v_{кр} = 30 \text{ м/с}$  ( $108 \text{ км/ч}$ ).

Для проверки полученных выше результатов проведено численное интегрирование системы дифференциальных уравнений, описывающих движение рельсового экипажа по круговой кривой  $R = 1000$  м со скоростью  $v = 40 \text{ м/с}$  ( $144 \text{ км/ч}$ ), при  $\kappa_{y2} = 1000 \text{ Тм}^{-1}$ . Результаты решения показали, что в этом случае имеет место колебательный процесс, причём с течением времени происходит нарастание

поперечных сил и перемещений.

Таким образом, при определённых значениях параметров ресурсного подвешивания движение рельсового экипажа может быть таким же, как и на прямых, неустойчивым, т.е. при скоростях выше критической имеют место интенсивные колебания типа виляния. При этом гребни колёс будут периодически набегать на наружный рельс.

Как показали результаты расчётов, изменения жёсткостей элементов буксового подвешивания в продольном  $K_{xI}$  и поперечном  $K_{yI}$  направлениях в диапазоне  $K_{xI} = K_{yI} = 200 \div 5000 \text{ Тм}^{-1}$  практически не оказывают влияния на устойчивость движения и величины поперечных сил, действующих на колёсную пару  $U_{II}$  и набегающее колесо  $U_{III}^*$ . При уменьшении  $K_{xI}$  и  $K_{yI}$ , начиная со значений  $200 \text{ Тм}^{-1}$ , величины сил  $U_{II}$ ,  $U_{III}^*$  и запас устойчивости несколько уменьшаются, однако значения  $K_{xI} = K_{yI} < 100 \text{ Тм}^{-1}$  неприемлемы из условия устойчивости движения вагона на прямой.

Величины вертикальных и поперечных сил, полученных из решения нелинейных алгебраических уравнений при жёсткости упругих элементов буксового подвешивания, равной  $K_{xI} = K_{yI} = 10000 \text{ Тм}^{-1}$  (что можно считать эквивалентным жёсткому соединению рам тележек и колёсных пар), сопоставлялись с результатами расчёта по методу динамического вписывания. Сравнение результатов показало, что в кривых малого радиуса ( $R = 350 \text{ м}$ ) значения сил, полученных из решения нелинейных алгебраических уравнений и по методу динамического вписывания, близки по величине, а в кривых большого радиуса ( $R \geq 1000 \text{ м}$ ) метод динамического вписывания даёт несколько завышенные значения сил. Это объясняется тем, что силы псевдоскольжения в кривых большого радиуса могут оказаться значительно меньшими, чем силы трения. При использовании ме-

тогда динамического вписывания силы, приложенные к колёсам, принимаются равными силам кулонова трения.

В работе оценено влияние профиля поверхности катания колеса на устойчивость движения рельсовых экипажей. Как показали результаты исследований, очертание профиля поверхности катания колёс может оказывать существенное влияние не только на величины поперечных сил  $Y_{II}$  и  $Y_{III}^*$  в стационарном режиме движения, но и на устойчивость движения экипажей.

При исследовании стационарных режимов и устойчивости криволинейного движения моторного вагона электропоезда ЭР-200 получены результаты, приводящие к выводам, аналогичным указанным выше для пассажирского вагона с тележками типа КВЗ-ЦНИИ.

Из экипажей перспективных конструкций, предназначенных для движения по криволинейным участкам с высокими скоростями, рассмотрены вагоны с принудительным наклоном кузова, вагоны с управляемыми тележками и вагоны, имеющие как принудительный наклон кузова, так и управляемые тележки. Показано, что в случае, когда вагон оборудован системой принудительного наклона кузова, величина не погашенного поперечного ускорения кузова уменьшается и тем самым улучшаются условия комфорта пассажиров.

Величины поперечных сил, действующих на колёсные пары, у вагонов с принудительным наклоном кузова и обычных вагонов практически одинаковы. Это качественно подтверждается результатами, полученными в 1970 году фирмой *Sumitride* (Япония) при проведении натурных испытаний экипажей, оборудованных системой принудительного наклона кузова и не имеющих такой системы.

Следует отметить, что поперечные силы, действующие на набегавшие колёса, у вагона с принудительным наклоном кузова больше,



чем у вагона с тележками типа КВЗ-ЦНИИ, и их разница возрастает с увеличением  $Q_H$ . Величины этих сил можно снизить за счёт управления движением тележек в кривых. Для этого к тележкам нужно приложить моменты сил, поворачивающие их относительно кузова так, чтобы поперечные силы, действующие на переднюю и заднюю колёсные пары, были бы близки по величине. Как показали результаты расчётов, величины этих моментов существенно растут с увеличением кривизны и практически не зависят от скорости движения. Так, например, для того, чтобы поперечные силы, действующие на переднюю и заднюю колёсные пары, были одинаковы, нужно приложить момент, равный 1 Тм в кривой  $R = 1000$  м и 3 Тм в кривой  $R = 350$  м. Поперечные силы, действующие на переднюю по ходу движения колёсную пару и набегающее колесо, у вагона с управляемыми тележками меньше, чем у обычного вагона. Преимущества вагонов с управляемыми тележками в большей степени проявляются при движении по кривым малого радиуса.

В результате исследований установлено, что запас устойчивости для рельсовых экипажей рассмотренных конструкций в диапазоне скоростей  $v = 10 \div 50$  м/с ( $36 \div 180$  км/ч) на круговых кривых ( $R = 250, 350, 600, 1000$  м) практически одинаков.

В пятой главе проведена проверка разработанной методики исследования криволинейного движения рельсовых экипажей на примере грузового вагона с тележками типа УВЗ-ЛИИИТ. При этом оспаривались результаты теоретических исследований и опытных данных, полученных в ходе динамических (ходовых) испытаний четырёхосных полувагонов с тележками конструкции Уралвагонзавода (50Х-508, УВЗ-6КМ, УВЗ-ЛИИИТ) на скоростном полигоне ЦНИИ МПС (участок Майкоп - Белореченская Северо-Кавказской железной дороги).

Эти испытания проведены в марте - апреле 1975 года силами Уралвагонзавода, ДИИТа, ЛИИЭТа, ЦНИИ МПС и ДОИМ АН УССР.

Для грузового вагона с тележками типа УВЗ-ЛИИЭТ составлены уравнения, описывающие движение его по круговым кривым. Эти уравнения представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений 62-го порядка. Решение уравнений проведено на ЭЦМ "Минск-22М" при конструктивных значениях параметров для случая движения полувагона со скоростями 60+135 км/ч по круговой кривой  $R = 800$  м ( $h_g = 0,15$  м) без неровностей.

Анализ результатов численного интегрирования проводился по графикам изменения во времени величины  $\Delta\psi$  - угла поворота (в плане) шкворневых балок тележек относительно кузова. При этом установлено, что при  $v \geq 120$  км/ч на круговой кривой  $R = 800$  м имеет место не затухающие колебания типа вылиния ( $\Delta\psi$ ) относительно смещённого положения, обусловленного кривизной пути. С уменьшением скорости движения полувагона при  $v \leq 100$  км/ч колебания с течением времени затухают ( $\Delta\psi$  принимает постоянное значение), т.е. движение полувагона устойчиво. Характер изменения  $\Delta\psi$  в зависимости от скорости согласуется с записями аналогичной величины в опытах.

По осциллографическим записям в каждом опыте наряду с другими динамическими характеристиками определялись максимальные значения  $\Delta\psi$ . По этим данным получены точечные графики распределения измеренных величин в зависимости от скорости движения. Кривая зависимости  $\Delta\psi(v)$ , полученная теоретически, лежит в пределах поля опытных данных.

Кроме анализа и сопоставления величины изменения угла поворота (в плане) шкворневых балок тележек относительно кузова про-

ведена также статистическая обработка осциллографических записей  $\Delta\psi(t)$ . Графики изменения спектральной плотности  $S(\nu^*)$ , построенные для величины  $\Delta\psi$  при скоростях 120, 130 и 135 км/ч, показали, что максимальная спектральная плотность приходится на частоты  $\nu^*$  существенно зависящие от скорости движения. При этом установлено, что зависимость  $\nu^*(v)$  близка к линейной. Частоты ( $\nu^*$ ) колебаний шкворневых балок относительно кузова, полученные теоретически, хорошо согласуются с экспериментальными. Различие в значениях этих частот не превышает 6,5%.

### Заключение

В работе исследовано движение рельсовых экипажей по криволинейным участкам. При этом решены следующие вопросы:

Разработана математическая модель движения рельсового экипажа по криволинейным участкам пути произвольного очертания в плане, с помощью которой можно учесть основные особенности механической системы "экипаж-путь". Эта модель позволяет исследовать собственные и вынужденные пространственные колебания рельсовых экипажей различных конструкций.

Показано, что силы псевдоскольжения в круговых кривых малого радиуса по величине близки к силам трения, поэтому движение экипажа по криволинейным участкам пути большой кривизны нужно исследовать с учётом нелинейной зависимости сил псевдоскольжения от безразмерных характеристик проскальзываний колёс.

Разработана методика исследования стационарных режимов и устойчивости движения рельсовых экипажей в круговых кривых.

Проведена оценка динамических качеств существующих рельсовых экипажей (пассажирский вагон с токоприёмниками типа КВЗ-ЦНИИ и моторный вагон электропоезда ЭР-200) в кривых по величинам сил

6803a

взаимодействия, соответствующих стационарному движению, и результатам исследования устойчивости движения по первому приближению А.М.Ляпунова.

Установлено, что поперечные силы, действующие на колёсные пары и набегавшие колёса, линейно зависят от непогашенного поперечного ускорения и растут с увеличением скорости движения и кривизны пути.

Показано, что параметры рессорного подвешивания и очертание профиля поверхности катания колёс могут оказывать существенное влияние на стационарные режимы и устойчивость криволинейного движения рельсовых экипажей. Так, при определённых значениях параметров движение вагонов по круглым кривым может быть неустойчиво, т.е. будут иметь место колебания относительно стационарного режима, амплитуды которых растут с течением времени.

Сравнение результатов теоретических исследований устойчивости движения по криволинейным и прямолинейным участкам пути показало, что запас устойчивости на кривой может быть меньше, чем на прямой. Поэтому наряду с исследованиями устойчивости прямолинейного движения целесообразно проведение исследований устойчивости криволинейного движения.

Проведено исследование стационарных режимов и устойчивости движения некоторых типов экипажей перспективных конструкций (вагонов с принудительным наклоном кузова, с управляемыми тележками и вагонов, имеющих как систему принудительного наклона кузова, так и управляемые тележки) по круговым кривым. Сравнение динамических качеств вагона с принудительным наклоном кузова и пассажирского вагона с тележками типа КВЗ-ЦНИИ показало, что принудительный наклон кузова в поперечной плоскости, улучшающий усло-

вия комфорта при движении экипажей по криволинейным участкам пути с высокими скоростями, не оказывает существенного влияния на величины поперечных сил, действующих на колесные пары. Однако вагоны с принудительным наклоном кузова при криволинейном движении оказывают несколько большее силовое воздействие на путь, чем обычные пассажирские вагоны.

Показано, что одним из способов уменьшения поперечных сил, действующих на первую по ходу движения колесную пару и набегавшее колесо каждой тележки, является применение управляемых тележек.

Проведенное сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показало, что разработанная математическая модель рельсового экипажа достаточно полно отражает характер поведения экипажа при его криволинейном движении.

Разработанные методики исследования вынужденных колебаний, стационарных режимов и устойчивости криволинейного движения использованы при оценке динамических качеств вагона с принудительным наклоном кузова, конструкция которого предложена ВНИИ вагоностроения и МЭИ. По результатам выполненных исследований предложены рекомендации, принятые ВНИИ вагоностроения для разработки конструктивных схем макетного образца вагона с принудительным наклоном кузова.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. О математической модели рельсового экипажа, движущегося в кривой произвольного очертания. В об.: Некоторые задачи механики скоростного наземного транспорта. Киев, "Наукова думка", 1974 (соавторы: В.А.Лазарян, М.А.Мапур).

НТБ  
ДНУЖТ

2. К вопросу об устойчивости криволинейного движения рельсового экипажа. Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, вып. 159/21. Днепропетровск, 1975 (соавторы В.А.Лазарян, М.А.Мацур).

3. О вынужденных колебаниях пассажирского вагона при движении по криволинейным участкам пути. Деп. в ЦНИИТЭИ МПС, 15 июня 1976, № 356/76 (соавторы Н.А.Радченко, Т.Ф.Мокрый).

4. Об устойчивости криволинейного движения вагона электропоезда ЭР-200. Деп. в ЦНИИТЭИ МПС, 15 июня 1976, № 357/76 (соавторы Н.А.Радченко, Т.Ф.Мокрый).

5. О стационарных режимах и устойчивости движения рельсовых экипажей в круговых кривых. Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, вып. 182/22. Днепропетровск, 1976 (соавторы В.А.Лазарян, Н.А.Радченко).

6. Влияние нелинейности сил псевдоскольжения на движение рельсового экипажа по кривой. В сб.: Нагруженность, колебания и прочность сложных механических систем. Киев, "Наукова думка", 1977 (соавтор М.А.Мацур).

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ ЭКИПАЖЕЙ ПО КРИВОЛИНЕЙНЫМ УЧАСТКАМ ПУТИ

БТ 68068, К печати 20.07.1977 года. Слано в производство 22.07.1977г. Формат 60х84 1/16. Усл.печ.л. 1,16. Тираж 130. Заказ № 8363.  
Городская типография № 3 Днепропетровского областного управления по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 320002, г.Днепропетровск, ул.Фрунзе, 6.