

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

На правах рукописи

ГАЛЬЧЕНКО Лариса Антоновна

РАЗЛИЧНЫЕ МОДЕЛИ ПОДРЕЛЬСОВОГО ОСНОВАНИЯ
В ИССЛЕДОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО
СОСТАВА И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО 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 – 1979

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском отделении Института механики Академии наук Украинской ССР и в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта

Научный руководитель

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

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А.Н.Савоськин,
кандидат технических наук, доцент С.И.Конашенко.

Ведущее предприятие - Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта.

Защита состоится " " мая 1979 г. в " " час. на заседании специализированного совета К И4.07.01 в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта имени М.И.Калинина (г.Днепропетровск, 320629, ГСП, ул.Университетская,2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " " апреля 1979 г.

Ученый секретарь специализированного
совета кандидат технических наук,
доцент Л.В.ПЕТРОВИЧ

КАБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

67870

Актуальность темы. Решение важных народнохозяйственных задач по увеличению грузооборота и объемов пассажирских перевозок, поставленных перед железнодорожным транспортом XXV съездом партии, связано с дальнейшим повышением веса и скорости движения грузовых и пассажирских поездов. В условиях высокоскоростного движения существенно возрастает влияние характеристик железнодорожного пути, в том числе инерционных, на ходовые качества локомотивов и вагонов. Успешному решению проблемы выбора оптимальных динамических качеств конструкций рельсовых экипажей, как правило, предшествуют теоретические исследования. Поэтому развитие и совершенствование методов исследования динамики подвижного состава и, в частности, процессов взаимодействия экипажа и пути, позволяющих учитывать упругие, диссипативные и инерционные его свойства, представляют одну из актуальных задач практики совершенствования существующих и создания новых типов транспортных средств.

Цель работы является проведение исследований вынужденных колебаний железнодорожных экипажей, движущихся по инерционному, упруго-вязкому пути; оценка влияния выбора модели основания на результаты решения поставленной задачи; обоснование целесообразности применения в расчетах некоторых из рассмотренных моделей; получение функций прогибов пути для упругого полупространства и волновой модели основания, предложенной Г.Б.Муравским; разработка рациональных способов вычисления указанных функций.

Методы исследования. В диссертационной работе использован метод математического моделирования на цифровых вычислительных машинах.

Решение задачи о колебаниях бесконечно длинной балки, лежащей на основании по Г.Б.Муравскому, с учетом влияния динамических осей осуществлено методом предельного перехода к пределу двойных ин-

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

тегралов Фурье.

Для определения значений функций влияния прогибов пути, полученных в виде несобственных интегралов от осциллирующих функций, были применены методы численного интегрирования с учетом отмеченных обстоятельств.

Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений движения для отыскания динамических характеристик рельсовых экипажей выполнено на ЭЦМ методами Рунге-Кутты и Адамса-Башфорта.

Научная новизна. Впервые проведено исследование вынужденных колебаний железнодорожных экипажей при использовании в расчетной схеме пути различных моделей подрельсового основания. Получены функции влияния прогибов пути и распределения вертикальных перемещений в основании для упругого полупространства в классической постановке и в упрощенной трактовке по Г.Б.Муравскому. Предложены эффективные приемы численного интегрирования функций влияния прогибов пути, позволяющие значительно упростить вычисления и существенно сократить время машинного счета. Рассмотрено влияние моделей основания, их параметров на вид функции прогибов пути и на значения коэффициентов дифференциальных уравнений колебаний системы "экипаж-путь". Сравнительный анализ коэффициентов показал, что значения динамических характеристик вагонов для одних моделей не будут отличаться между собой и могут отличаться для других моделей основания. В последнем случае выполнено исследование и дана оценка влияния свойств моделей на значения усилий в рессорном подвешивании вагона и сил взаимодействия экипажа и пути. Обоснована целесообразность применения в задачах динамики рельсовых экипажей таких достаточно простых расчетных схем подрельсового основания, как модель В.З.Власова или модифицированная винклеровская модель.

Практическая ценность и внедрение результатов работы.

Проведенные исследования являются частью работ по развитию методов

ИТЬ
ДНУКТ

расчета динамики подвижного состава и направлены на теоретическое обоснование расчетных схем, применяемых при решении проблемы взаимодействия экипажа и пути. Полученные результаты и применяемая методика исследований позволяют рекомендовать те модели, на основе которых получаются достаточно простые решения поставленных задач и более точные оценки динамических качеств железнодорожных экипажей. Результаты работы используются в Днепропетровском отделении Института механики АН УССР и Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта при проведении теоретических исследований колебаний транспортных экипажей. Рекомендации по применению моделей основания переданы Отделению комплексных испытаний ЦНИИ МПС для использования в разработках по усовершенствованию существующих и созданию перспективных конструкций железнодорожных экипажей, а также для расчетов по воздействию различных типов подвижного состава на железнодорожный путь и, в частности, на его нижнее строение.

Апробация. Основные результаты работы доложены на Всесоюзной конференции по механике наземного транспорта (Днепропетровск, 1977), Всесоюзной научно-технической конференции по борьбе с шумом и вибрацией на железнодорожном транспорте (Ленинград, 1977), сетевой научно-технической конференции по динамике и мерам повышения эксплуатационной надежности локомотивов в условиях железных дорог Урала и Сибири (Омск, 1972), 33 научно-технической конференции (Брянск, 1972), Днепропетровском городском семинаре "Общая механика" (1973г., 1977г., 1978г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 6 печатных работах.

Структура работы обусловлена необходимостью освещения основных достижений в рассматриваемой области, обоснования направления исследования, постановки задачи, описания математических моделей,

ДНУКТ

методов решения, изложения результатов с сопоставлением теоретических и экспериментальных данных.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и выводов. Она изложена на 144 страницах, включая 34 рисунка, 13 таблиц, список литературы, содержащий 127 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Теоретические основы методов исследования взаимодействия подвижного состава и пути вытекают из общих принципов решения задач динамики машин и заложены в трудах известных отечественных и зарубежных ученых Н.П.Петрова, С.П.Тимошенко, Н.Э.Жуковского, А.М.Годыцкого-Цвирко, М.В.Бимокурова, М.Ф.Вериго, С.Б.Бершинского, В.А.Лазаряна, Г.Марье, В.Б.Медея. Значительный вклад в изучение динамических качеств железнодорожных экипажей и в углубление представлений о процессе взаимодействия рельсового транспорта и пути внесли Г.П.Бурчак, Д.О.Грачева, Б.Н.Данилов, А.А.Камаев, А.Я.Коган, С.И.Конашенко, М.Л.Коротенко, С.М.Куценко, А.А.Львов, А.Н.Савоськин, В.Ф.Ушклов, М.А.Фришман, И.И.Челноков, Г.М.Шахуняц, В.Ф.Яковлев и другие.

Важные теоретические и экспериментальные работы по динамике и прочности существующего и перспективного высокоскоростного наземного транспорта проводятся коллективами научных сотрудников ЦНИИ МПС, ВНИИ вагоностроения, ДОИМ АН УССР, ДИИТа, ЛИИЖТа, МИИТа, РИИЖТа, ХПИ, БИТМа и другими.

Современные тенденции развития исследований взаимодействия экипажа и пути характеризуется изучением их колебаний как единой механической системы. Разносторонние теоретические и экспериментальные исследования, проведенные с учетом этой особенности, показали,

что ходовые качества вагонов и локомотивов существенно зависят от свойств пути. Первоначально в расчетах преимущественно рассматривались упругие и диссипативные его свойства. В настоящее время в условиях высокоскоростного движения весьма большое значение приобретают также инерционные свойства пути.

В первой главе диссертационной работы дан обзор различных моделей подрельсового основания, проведен анализ их свойств с точки зрения возможности применения моделей в задачах динамики рельсовых экипажей, сформулированы цели исследования.

Один из подходов к изучению влияния свойств пути на колебания экипажа состоит в использовании дискретной модели пути, согласно которой каждой колесной паре приводится в соответствие упруго-подвешенная задемпфированная масса. Однако путь представляет собой систему с распределенными параметрами и поэтому не вызывает сомнений целесообразность применения в расчетной схеме пути континуальных моделей подрельсового основания.

Ввиду указанных особенностей рассматриваемых задач возникла необходимость в уточнении расчетной схемы пути, позволяющей учитывать его инерционные свойства, и в выборе рациональной континуальной модели основания, отражающей его наиболее важные свойства и обеспечивающей получение надежных результатов и достаточно простых решений.

Как известно, простейшей из континуальных моделей является Винклеровское основание, интерпретируемое как система не связанных между собой пружин. Модель характеризуется одним параметром k^* , с помощью которого давление на поверхности основания $q(x)$ выражается через его вертикальное перемещение $w(x)$ зависимостью $q(x) = k^* w(x)$. Однако эта модель не позволяет непосредственно учитывать инерционные свойства основания, не обладает распределительной способностью и потому является непригодной для реше-

ДНУЖТ

ние рассмотренного круга задач.

Наиболее строгой из континуальных моделей с точки зрения удовлетворения уравнениям теории упругости является упругое изотропное полупространство. Расчету конструкций различных типов, расположенных на упругом полупространстве, посвящены работы известных ученых Б.Н.Кемочкина, М.И.Горбунова-Посадова, Б.Г.Коренева, А.П.Филиппова, О.Я.Шехтер, М.Г.Альперина, Д.П.Винокурова, А.Г.Ишковой, В.Л.Рвачева и других.

Использование модели упругого полупространства при расчете конструкций на сжимаемом основании позволяет корректно описать напряженно-деформированное состояние во всей области, удовлетворить всем крайним условиям, а также учесть распределительную способность основания и его изерсионные свойства. Однако в этом случае получаются громоздкие и сложные решения и, кроме того, модели имеют существенный недостаток - чрезмерная распределительная способность. Последнее обстоятельство привело к появлению так называемых "промежуточных" моделей, распределительные свойства которых носят промежуточный характер между гипотезой Винклера и упругим полупространством. К их числу относится, в частности, техническая двухпараметрическая модель основания, допускающая различные интерпретации (К.Вигхардта, П.Л.Пастернака, М.М.Филоненко-Бородича, В.З.Власова, С.И.Конашенко - обобщенное винклеровское основание).

Несмотря на различие в исходных идеях и моделях, различные трактовки модели основания с двумя упругими характеристиками описываются одними и теми же дифференциальными уравнениями равновесия вида

$$q(x) = k_1^* w(x) - k_2^* w''(x), \quad (I)$$

где k_1^* - вторая упругая характеристика основания, и отличается одна от другой лишь истолкованием расчетного параметра k_2^* .

ДНУЖТ

Модель с двумя характеристиками получила широкое распространение главным образом потому, что она дает более быстрое затухание осадок поверхности основания по сравнению, например, с упругим полупространством, а также более простые по форме решения. Однако этой модели свойственен ряд известных недостатков.

Значительный интерес для использования в исследованиях железно-дорожных экипажей представляет модель основания, предложенная в работах Г.Б.Муравского и названная волновой моделью. Модель трактуется как упругий слой конечной мощности H , материал которого характеризуется модулем сдвига D и параметром B , определяющим работу основания на сжатие.

Дифференциальное уравнение равновесия основания получено из соотношений трехмерной теории упругости в предположении, что горизонтальные перемещения u и v равны нулю:

$$B \frac{\partial^2 w}{\partial \zeta^2} + D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial \eta^2} \right) - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

ρ - плотность материала основания; оси ξ , η расположены на поверхности основания, а ось направлена вглубь его.

Граничные условия при загрузении поверхности давлением $p(\xi, \eta, t)$ имеют вид

$$B \frac{\partial w}{\partial \zeta} = -p(\xi, \eta, t); \quad w = 0, \quad \text{при } |\xi| \rightarrow \infty, \quad |\eta| \rightarrow \infty, \quad \zeta = H. \quad (3)$$

Модель, определяемая уравнениями (2)-(3), является более строгой, чем двухпараметрическая. Решения, полученные на ее основе, должны быть проще, чем аналогичные решения, найденные с использованием уравнений теории упругости. Модель позволяет принимать во внимание распределительные и инерционные свойства оснований.

В настоящей работе рассмотрен также ряд других моделей.

Из большого числа континуальных моделей основания в исследо-

ДНУЖТ

влияния на динамику рельсовых экипажей использовались лишь временно.

На базе решения задачи о колебаниях бесконечно длинной балки на идеализированном винклеровском основании (учитывающем инерционные свойства, но не обладавшем распределительной способностью) А.Я.Коганом предложен новый метод динамического расчета элементов экипажа и пути, позволяющий рассматривать любой закон изменения движущейся нагрузки. В ряде работ, выполненных в ДОИМ АН УССР и ДИИТе, апробирована двухпараметрическая модель В.З.Власова. Эта модель приводит к компактным расчетным алгоритмам, обеспечивает хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов, однако, обладает известными недостатками.

Таким образом, рассмотрены различные континуальные модели основания и поставлены следующие цели исследования: оценить целесообразность использования различных моделей в задачах динамики рельсовых экипажей; провести анализ результатов поставленной задачи, на основе которого сопоставить различные модели основания между собой и с экспериментальными данными; произвести оценку влияния выбора модели на результаты решения задачи о взаимодействии экипажей и пути.

Вторая глава посвящена построению математической модели для исследования вертикальных колебаний системы "экипаж-путь".

Рассмотрены вертикальные в продольной плоскости симметрии колебания экипажей с одинарным (грузовой вагон на тележках типа ЦНИИ-ХЗ) и двойным (скоростной вагон-лаборатория) рессорным подвешиванием. Такая постановка задачи предполагает введение допущения о том, что вертикальные неровности на обеих рельсовых ямках одинаковы и симметричны относительно продольной оси пути. Расчетные схемы экипажей приняты в виде систем абсолютно твердых тел, соединенных между собой упруго-демпфативными элементами связей.

ИТЬ
ДНУЖТ

Путь моделируется бесконечно длинной балкой, лежащей на сплошном деформируемом основании. В качестве расчетных моделей основания рассмотрены упругое полупространство, волновая модель, двухпараметрическая модель в трактовке В.З.Власова, модифицированная модель Винклера. Диссипация энергии в системе "экипаж-путь" учитывалась по гипотезе Фойгта. Дифференциальные уравнения колебаний экипажей составлялись в форме уравнений Лагранжа второго рода. Для их составления необходимо иметь выражения кинетической и потенциальной энергий пути. Последние являются функциями прогибов балки $Z(x, t)$ и перемещений $w(x, y, z, t)$ точек основания.

В настоящей работе при решении задачи с применением волновой модели и упругого полупространства для определения прогибов балки используется гипотеза Г.М.Пахуняца

$$Z(x, t) = Z(0, t)F(x) \quad (4)$$

и аналогичная гипотеза для отыскания перемещений в основании:

$$w(x, y, z, t) = w_p(t)F_w(x, y, z),$$

где $Z(0, t)$, $w_p(t)$ - соответственно прогиб балки и перемещение основания в точке приложения силы $P(t)$; $F(x)$, $F_w(x, y, z)$ - функции влияния распределения прогибов балки по ее длине и вертикальных перемещений w в основании.

Получение искомых функций $F(x)$ и $F_w(x, y, z)$ представляет собой самостоятельную задачу.

Такая задача для волновой модели основания решена в диссертационной работе, исходя из уравнений равновесия основания (2)-(3), дифференциального уравнения колебаний балки и следующих условий сопряжения балки и основания: реактивные давления по ширине δ балки распределяются равномерно, а за ее пределами отсутствуют; вертикальные перемещения точек поверхности $w(x, 0)$ основания под балкой равны прогибам $w_g(x)$ балки вдоль ее продольной оси симметрии

Решение найдено в форме

$$w(x, y, z) = \frac{2D}{\pi^2 \delta \sqrt{BC}} F(x, y, z) \int_0^{\infty} \frac{A(u) S(u)}{u} du,$$

а искомые функции влияния в виде

$$F(x, y, z) = \frac{\int_0^{\infty} [A(u) \cos \alpha x + B(u) \sin \alpha x] \frac{S(u, y, z)}{u} du}{\int_0^{\infty} A(u) \frac{S(u)}{u} du}, \quad (5)$$

$$F(x) = \frac{\int_0^{\infty} [A(u) \cos \alpha x + B(u) \sin \alpha x] \frac{S(u)}{u} du}{\int_0^{\infty} A(u) \frac{S(u)}{u} du}, \quad (6)$$

где $A(u) = \frac{D(u)}{D^2(u) + d^2(u)}$, $B(u) = \frac{d(u)}{D^2(u) + d^2(u)}$; (7)

$$S(u, y, z) = \int_0^{\infty} \frac{\sin u \tau}{\tau \sqrt{1 + \tau^2}} \cos \frac{2}{\delta} u y \exp\left(-\frac{2}{\delta} \sqrt{D/B} u z \sqrt{1 + \tau^2}\right) d\tau, \quad S(u) = \int_0^{\infty} \frac{\sin u \tau}{\tau \sqrt{1 + \tau^2}} d\tau.$$

В соотношениях (7) обозначено:

$$D(u) = 1 + \varepsilon u S(u)(u^2 - \kappa^2); \quad d(u) = \varepsilon \eta^2 S(u); \quad \varepsilon = \frac{EJ}{\pi \sqrt{BD}} \left(\frac{2}{\delta \sqrt{m}}\right)^4$$

$$\kappa^2 = \frac{\rho_0}{EJ} v^2 \left(\frac{\delta}{2} \sqrt{m}\right)^2; \quad \eta^2 = \frac{h v}{EJ} \left(\frac{\delta}{2} \sqrt{m}\right)^3, \quad \alpha = \frac{2u}{\delta \sqrt{m}}; \quad m = \frac{C}{D}, \quad C = D - \rho v^2.$$

EJ — жесткость балки при изгибе; ρ_0 — погонная масса балки; h — коэффициент вязкого трения; v — скорость движения экипажа.

Задача о колебаниях бесконечно длинной балки на упругом полупространстве при квазистатическом нагружении ее постоянной нагрузкой решена А.П.Филипповым. На основании этого решения в данной работе найдены функции $F(x)$ и $F(x, y, z)$ для упругого пространства.

Функции влияния прогибов балки (6) для волновой модели осно-

НТБ
ДНУЖТ

вания получена в виде несобственных интегралов с особенностями. Произведена оценка влияния особенностей на сходимость интегралов. Рассмотрены различные приемы их вычисления с учетом того обстоятельства, что под знаком интеграла содержатся осциллирующие функции. Выбраны наиболее рациональные приемы вычисления интегралов, позволяющие существенно упростить вычисления функции $F(x)$ и ее производных, а также значительно сократить затраты машинного времени (в 2,2-5,5 раза).

Исследовано поведение функции влияния (6) при варьировании упругих постоянных волновой модели, параметров балки и скорости движения экипажа. Установлено, что изменение указанных параметров в широком диапазоне их значений не приводит к изменению знака функции.

Последнее обстоятельство привело к необходимости сопоставления функций $F(x)$, найденных для различных моделей основания (двухпараметрической модели в трактовке В.З.Власова, волновой модели и упругого полупространства с использованием различных решений). По решениям М.И.Горбунова-Посадова, Б.Г.Коренева, В.Л.Рвачева, как ранее по решению А.П.Филиппова, в настоящей работе получены функции влияния прогибов балки $F(x)$. Сравнение выполнено для условий статического действия нагрузки на балку. Показано, что функции для упругого полупространства (по Б.Г.Кореневу, А.П.Филиппову, В.Л.Рвачеву) и волновой модели (при определенных значениях ее упругих постоянных) совпадают и не меняют знак в отличие от аналогичных функций $F(x)$, полученных для упругого полупространства (по М.И.Горбунову-Посадову) и модели В.З.Власова. При этом, варьируя одним из параметров модели В.З.Власова - коэффициентом затухания γ - можно добиться совпадения двух последних из этих функций. Различный вид функций $F(x)$, найденных для упругого полупространства следует объяснить различной постановкой задачи. В постановке

М.И.Горбунова-Посадова контактные условия сопряжения балки и упругого полупространства выполняются не только вдоль продольной оси симметрии балки, а и по всей ее опорной площадке.

В связи с двумя видами функций $F(x)$ в дальнейшем рассматривались две модели основания. Одна из них характеризуется знакопеременной (модель В.З.Власова), а другая знакопостоянной (модель Г.Б.Муравского) функцией $F(x)$. В этих условиях поставленная задача свелась к анализу вынужденных колебаний железнодорожных экипажей при использовании моделей основания по В.З.Власову и Г.Б.Муравскому.

Составление уравнений движения экипажей в случае волновой модели сопряжено со значительными математическими трудностями, связанными преимущественно с применением функции распределения вертикальных перемещений в основании (5). Для упрощения решения задачи введено допущение, аналогичное рассматриваемому в работах В.З.Власова, по которому перемещения $w(x, y, z, t)$ можно представить в виде

$$w(x, y, z, t) = Z(x, t) \varphi(y) \varphi(z), \quad (8)$$

где $\varphi(x)$, $\varphi(y)$ - функции распределения вертикальных перемещений соответственно по глубине основания и в поперечном по отношению к пути направлении.

Благодаря введению допущения (8) удалось воспользоваться методикой исследования вынужденных колебаний экипажа, разработанной в трудах В.А.Лазеряна применительно к двухпараметрической модели основания в трактовке В.З.Власова. Указанная методика позволяет выразить перемещения всех точек балки и основания через перемещения точек контакта колесных пар с рельсами, что дает возможность описать совместные колебания экипажа и пути системой обыкновенных дифференциальных уравнений, порядок которой определяется числом степе-

ной свободы расчетной схемы экипажа. При этом учет нестационарных, диссипативных и упругих свойств основания отражается лишь на численных коэффициентах уравнений.

Данная методика позволяет провести сопоставление результатов решения задачи взаимодействия экипажа и пути при различных расчетных схемах основания без изменения структуры дифференциальных уравнений движения экипажа.

В матричной форме уравнения вынужденных колебаний рассматриваемых типов экипажей имеют вид

$$A\ddot{\bar{q}} + B\dot{\bar{q}} + C\bar{q} = \bar{D}, \quad (9)$$

где A, B, C - соответственно матрицы инерционных, диссипативных и квазиупругих коэффициентов; $\bar{q}, \dot{\bar{q}}, \ddot{\bar{q}}$ - векторы обобщенных координат, скоростей, ускорений; \bar{D} - вектор обобщенных сил.

Системы уравнений (9) при использовании моделей В.З.Власова и Г.Б.Муравского отличаются одна от другой лишь значениями коэффициентов. Последние являются функциями скорости движения экипажа, параметров моделей основания и зависят от вида функции $F(x)$.

Решение уравнений (9) осуществлено при помощи ЭВМ численным интегрированием по методу Адамса-Башфорта (скоростной этап - лаборатория) и методу Рунге-Кутты (грузовой этап - на тележках ЦНИИ-ХЗ).

В третьей главе рассматривается влияние моделей, их параметров и скорости движения на коэффициенты уравнений колебаний экипажа.

Такого рода влияние исследовано на примере грузового полувагона на тележках ЦНИИ-ХЗ.

Вычисление ненулевых элементов матриц инерционных, диссипативных и квазиупругих коэффициентов для модели В.З.Власова не представляет затруднений. Они определялись по формулам, содержащим элементарные функции. Для модели Г.Б.Муравского искомые коэффициенты вычислялись при помощи численных методов.

Для обеспечения соответствия расчетных параметров модели эо-

НТ
ДУЖТ

нования реальным характеристикам пути в работе использована такая важная и наиболее полно изученная его характеристика как вертикальная жесткость.

Расчетные значения параметров модели В.З.Власова (E_0, γ) выбирались по экспериментальным данным о вертикальной жесткости пути. Эквивалентные расчетные параметры модели Г.Б.Муравского принимались в зависимости от трех различных критериев сопоставимости: 1) равенство интегральных характеристик $\bar{K} = \frac{E_0 \delta \gamma}{2(1-\delta^2)}$ и $\bar{C} = \frac{E_0 \delta}{4\gamma(1-\delta)}$ модели В.З.Власова соответствующим упругим постоянным $\bar{K} = \frac{E \delta \gamma}{2}$ и $\bar{C} = \frac{D \delta}{2\gamma}$ модели Г.Б.Муравского; 2) равенство вертикальной жесткости пути; 3) равенство модулей упругости E_0 .

Проведенный анализ влияния рассматриваемых факторов на коэффициенты уравнений движения вагона показал, что изменение параметров моделей основания весьма существенно сказывается на значениях этих коэффициентов, а увеличение скорости экипажа от 0 до 40 м/с практически не отражается на их значениях. В связи с этим скорость можно не принимать во внимание при определении указанных коэффициентов.

Увеличение модуля упругости E_0 от 1000 до 4000 т·м⁻² и коэффициента γ от 1 до 1,5 м⁻¹ приводит к уменьшению инерционных коэффициентов соответственно на 10-40 и 30-35% и к увеличению в 2,5-3,5 и 1,2-1,7 раза квазиупругих коэффициентов.

Установлено, что квазиупругие коэффициенты, найденные для различных моделей основания (В.З.Власова, Г.Б.Муравского) различаются в рассмотренном диапазоне изменения скорости не более чем в 1,5-1,8 раза, а инерционные коэффициенты - не более чем на 20-30%.

Сравниваемые коэффициенты получаются наиболее близкими при сопоставлении моделей по первому критерию. Наибольшие расхождения наблюдаются в случае сравнения по второму критерию.

Выполнено также сравнение рассматриваемых коэффициентов уравнений движения экипажа с соответствующими коэффициентами, получен-

ными для модифицированной винглеровской модели. Последние найдены по решению для модели В.З.Власова в предположении, что упругая постоянная \bar{C} характеризующая работу основания на сдвиг, равна нулю. В этом случае получается модель, состоящая из не связанных между собой массивных столбиков, позволяющая учитывать инерционные свойства. Оказалось, что модель В.З.Власова и модифицированная винглеровская модель в рассмотренном диапазоне изменения параметров приводят к практически одинаковым результатам: различие в значениях инерционных коэффициентов не превышает 2%, а в значениях квазиупругих коэффициентов - 12%.

Проведенная оценка результатов исследований даст возможность утверждать, что динамические характеристики экипажа для модели В.З.Власова и модифицированной винглеровской модели не будут практически отличаться между собой и могут отличаться от соответствующих характеристик, полученных по модели Г.Б.Муравского,

В четвертой главе приведены результаты серии расчетов по влиянию влияния свойств пути, учитываемых по различным гипотезам, на ходовые качества железнодорожных экипажей.

Исследования выполнены для двух типов экипажей: грузового вагона на тележках типа ЦНИИ-ХЗ и скоростного вагона-лаборатории (СВЛ). Критериями оценки ходовых качеств экипажей служили экстремальные значения динамических составляющих сил взаимодействия колес и рельсов и усилий в рессорном подвешивании вагонов.

Движение грузового полувагона рассмотрено в диапазоне скоростей 15-40, а СВЛ - в диапазоне 15-70 м/с. В качестве возмущающего воздействия приняты периодически повторяющиеся детерминированные неровности пути, моделирующие несовершенства в зоне стыка:

$$\eta_i = \frac{d}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{\lambda} x_i\right) [\sigma_0(x_i) - \sigma_0(x_i - \lambda)] \quad (0 \leq x_i \leq L_p),$$

где d и λ - глубина и длина неровности; L_p - длина рельсового звена; x_i - расстояние i -ой колесной пары от начала неровности;

σ_2 - функции Хевисайда.

Динамические характеристики грузового экипажа исследованы для ряда значений параметров пути, позволяющих до известной степени интегрально оценить работу основания и рельсо-шпальной решетки: $E_p = 1000$, $\gamma = 1,0$; $E_p = 1000 \text{ т} \cdot \text{м}^{-2}$, $\gamma = 1,5 \text{ м}^{-1}$ (вертикальная жесткость равна $\sim 4000, 6000 \text{ т} \cdot \text{м}^{-1}$, что соответствует пути на деревянных шпалах); $E_p = 4000 \text{ т} \cdot \text{м}^{-2}$, $\gamma = 1,5 \text{ м}^{-1}$ (вертикальная жесткость равна $\sim 17500 \text{ т} \cdot \text{м}^{-1}$, что соответствует пути на железобетонных шпалах).

Колебания СВМ исследованы в случае пути с достаточно высокой вертикальной жесткостью: $E_p = 4000 \text{ т} \cdot \text{м}^{-2}$, $\gamma = 1,5 \text{ м}^{-1}$.

Эквивалентные расчетные параметры волновой модели определялись в соответствии с указанными выше критериями сопоставимости моделей.

По результатам решений были построены зависимости динамических составляющих сил взаимодействия и усилий в рессорном подвешивании экипажей от скорости движения. Установлено, что с увеличением скорости и жесткости пути, возрастающей с ростом модуля E_p и коэффициента γ , разгружающие динамические добавки усилий S_i в подвешивании рассматриваемых экипажей нарастают незначительно, а догружающие добавки S_i даже несколько уменьшаются. Динамические составляющие сил взаимодействия S_{ij} в зависимости от указанных факторов растут более интенсивно, чем усилия S_i .

Суждение о влиянии особенностей рассматриваемых моделей основания на динамические характеристики экипажей составлено на основании сравнительного анализа зависимостей $S_i = f(v)$ и $S_{ij} = f(v)$ найденных для этих моделей.

Показано, что для пути с достаточно высокой вертикальной жесткостью сравнимые зависимости $S_i = f(v)$ практически совпадают при всех критериях сопоставимости моделей: максимальное расхождение в значениях усилий S_i для грузового вагона состави-

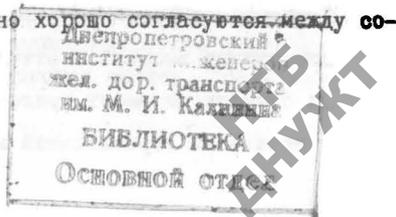
до 2%, а для СВЛ - 5%,

Для пути с относительно невысокой вертикальной жесткостью зависимости $S_i = f(v)$ различия более заметно. Здесь наибольшее различие в значениях рассматриваемых величин достигло 25% при скорости $v = 22,5$ м/с. Однако, если судить о влиянии моделей основания на величины усилий в подвешивании экипажа по полным значениям этих сил, то сравниваемые усилия отличаются не более чем на 5-6%.

Силы взаимодействия S_{ij} (как для СВЛ, так и для грузового полувагона) при сравнимых вариантах конструкции верхнего строения пути близки между собой, а их зависимости от скорости имеют одинаковый характер. Наиболее близкими результаты получаются при сравнении моделей по первому критерию; наибольшее различие в результатах имеет место при сравнении моделей по второму критерию.

Проведена оценка влияния давления соседних колесных пар тележек на выбранные критерии качества системы "экипаж-путь" для обеих моделей. Установлено, что влияние этого фактора на динамические добавки усилий S_i как грузового вагона, так и СВЛ весьма мало (не превышает 2-4%). Силы S_{ij} также близки хотя и различаются в большей степени (до 10% для грузового вагона и 16% для СВЛ).

Для проверки правильности применяемой методики исследования вынужденных колебаний экипажа результаты аналитических расчетов сопоставлены с данными натурных испытаний СВЛ, проведенных в 1972-1973 гг. на Приднепровской железной дороге коллективами ВНИИ вагоностроения, ДИИТ и ДОИМ АН УССР. Сопоставлялись силы взаимодействия и усилия в надбуксовом подвешивании экипажа. Аналогичное сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований проведено для грузового вагона. Показано, что теоретические и экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются между собой.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведены исследования по определению влияния свойств подрезсового основания, учитываемых по различным гипотезам, на динамические характеристики дискретно-континуальной системы "экипаж-путь" в рамках проблемы взаимодействия подвижного состава и пути. В качестве моделей основания рассмотрены двухпараметрическая модель в трактовке В.З.Власова, модифицированная винклеровская модель, упругое полупространство в классической постановке и в упрощенной трактовке, предложенной Г.Б.Муравским.

Для исследования вынужденных колебаний системы "экипаж-путь" при использовании волновой модели и упругого полупространства определены функции влияния прогибов балки и распределения вертикальных перемещений в основании при квазистатическом нагружении балки.

Предложены эффективные приемы численного интегрирования функций влияния прогибов пути, позволяющие значительно упростить вычисления и существенно сократить затраты машинного времени.

Показано, что коэффициенты дифференциальных уравнений колебаний экипажей для модифицированной винклеровской модели основания и модели В.З.Власова практически совпадают, но отличаются от соответствующих величин, найденных для модели Г.Б.Муравского. Это дает возможность утверждать, что ходовые качества экипажей также будут близки для модифицированной винклеровской модели и модели В.З.Власова и могут отличаться от аналогичных характеристик экипажей, полученных с использованием модели Г.Б.Муравского, что было подтверждено результатами исследования динамики различных типов рельсовых экипажей.

Установлено, что при параметрах основания, характерных для пути с достаточно высокой вертикальной жесткостью, способ учета инерционных свойств не имеет существенного значения. Для пути относительно невысокой вертикальной жесткости влияние свойств моделей на

ДНЕЖТ

динамические качества экипажей более существенно, если судить по динамическим добавкам усилий в экипаже. При анализе полных значений этих сил оцениваемое влияние весьма невелико: сравниваемые значения усилий разнятся не более чем на 5-6%. В связи с этим рекомендовано использовать в задачах динамики рельсовых экипажей более простые континуальные модели основания, какими являются модифицированное вишклеровское основание и модель В.З.Власова, обеспечивающие построение компактных расчетных алгоритмов и достаточно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов.

Хорошее согласование результатов теоретических исследований с данными натурных испытаний свидетельствует о корректности применяемой методики и возможности ее использования в разработках, связанных с созданием перспективного высокоскоростного подвижного состава.

Основное содержание диссертации опубликовано
в следующих работах автора:

1. Об установившихся колебаниях бесконечно длинной балки, лежащей на инерционном основании, при действии подвижной нагрузки. Труды ДИИТа, вып. 143, Днепропетровск, 1973.
2. О функциях влияния для упругого основания. Труды ДИИТа, вып. 152, Днепропетровск, 1973.
3. Динамическое воздействие подвижной нагрузки на бесконечную балку, лежащую на инерционном основании. Материалы 33 научно-технической конференции. Брянск, 1972.
4. К определению коэффициентов дифференциальных уравнений плоских колебаний системы "экипаж-путь". Труды ДИИТа, вып. 190/23, Днепропетровск, 1977 (соавтор В.А.Лазарян).
5. Сопоставление коэффициентов дифференциальных уравнений колебаний экипажа, полученных для некоторых моделей упругого основания. Динамика и прочность сложных механических систем. "Наукова думка", 1978.

6. Сопоставление усилий в системе "экслюз-пути", полученных с использованием некоторых моделей подрельсового основания. Труды ДИИТа, вып. 199/25, 1978.

Подписано в печать 16.04.1979. БТ01253.
Формат 60x84/16. Бумага типогр. № 2. Печать офсетная. 1,13 усл.-печлст.
0,9 уч.-изд.лст. Тираж 150 экз. Заказ № 892. Бесплатно.

Днепропетровский металлургический институт,
320005, Днепропетровск, пр. Гагарина, 4.

Редакцент ОЗ ДМетИ, 320005, Львовское шоссе, 3-6.

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ
ДНУЖТ