

18
3-23

10382

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

Залесский Анатолий Иосифович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ
СИСТЕМЫ "РЕЛЬСОВЫЙ ЭКИПАЖ-ПУТЬ"

01.02.06 – Динамика, прочность и надежность
машин, приборов и аппаратуры

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Днепропетровск – 1973 г.

НТБ
ДНУЖТ

На правах рукописи

**ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
МЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Залесский Анатолий Иосифович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ
СИСТЕМЫ "РЕЛЬСОВЫЙ ЭКИПАЖ-ПУТЬ"**

**01.02.06 - Динамика, прочность и надежность машин,
приборов и аппаратуры**

А в т о р е ф е р а т

**диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук**

Днепропетровск - 1973г.

**НТБ
ДНУЖТ**

4813a

Работа выполнена в Днепропетровском отделении Института механики АН УССР

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки УССР, академик АН УССР, доктор технических наук, профессор
В.А.ЛАЗАРНИ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор КРАКОВ Б.И.,
кандидат технических наук, доцент ЛЬВОВСКИЙ В.М.

Ведущая организация: Отделение комплексных испытаний Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Автореферат разослан "16" октября 1973 г.

Защита диссертации состоится "16" ноября 1973г. на заседании Ученого Совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (г.Днепропетровск-10, ул.Университетская,2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук

Б.В.ГУСЕВ

НТБ
ДНУЖТ

Решение задач по увеличению объемов перевозок, поставленных перед железнодорожным транспортом XXIV съездом КПСС, связано прежде всего с повышением веса и скорости движения поездов.

В связи с увеличением веса поездов и развитием высокоскоростного рельсового транспорта особое значение как для определения допустимых скоростей движения, так и с точки зрения оптимизации параметров подвижного состава, приобретает проблема взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути. Это обуславливает необходимость дальнейшего развития и совершенствования методов исследования и уточнения расчетных схем, применяемых при решении таких задач.

Реферлируемая работа посвящена дальнейшему развитию методики исследования вертикальных колебаний рельсовых экипажей с учетом упругих, инерционных и диссипативных свойств подрельсового основания.

Первая глава диссертации посвящена обсуждению состояния вопроса и обоснованию направления исследования.

История развития теории динамического воздействия подвижной нагрузки восходит к середине прошлого века, когда Умвлисом и Стоксом была решена задача о движении груза по невесомой балке. Такого типа задачи, связанные с потребностями бурно развивавшегося железнодорожного транспорта, привлекали многих выдающихся инженеров и ученых-механиков. Достаточно назвать имена выдающихся русских ученых-механиков Н.Е. Жуковского, А.Н. Крылова, С.П. Тимошенко, активно работавших в этой области.

Весьма значительный вклад в решение задачи о взаимодействии подвижного состава и пути вносят работы советских ученых М.Ф. Верига, А.М. Годыцкого-Цвирко, В.Н. Данилова, А.А. Камаева, А.Я. Когана, Н.Н. Кудрявцева, С.М. Куценко, В.Б. Медея, А.П. Флишпова, М.М. Филоненко-Бородяча, М.А. Фришмана, Г.М. Шахуняца, В.Ф. Яковлева и др.

Значительным шагом вперед в области динамики подвижного состава явились исследования В.А.Лазаряна и его учеников. В этих работах при изучении процессов взаимодействия подвижного состава и пути рассматривается движение не единичного колеса, как это принято в большинстве исследований, а всего экипажа, что позволяет наиболее полно изучить динамические процессы в системе "экипаж-путь".

Как показано в этих работах, для того, чтобы обеспечить требуемую надежность результатов при исследовании взаимодействия подвижного состава и пути, необходимо пользоваться достаточно сложной расчетной схемой, состоящей из трех основных частей: экипаж, деформируемый путь (рельсо-шпальная решетка) и деформируемое инерционное основание.

В зависимости от целей исследования экипаж может рассматриваться как система либо абсолютно твердых, либо деформируемых тел. Если при исследованиях необходимо определять усилия и напряжения в элементах экипажа, должна быть учтена деформируемость этих элементов. В большинстве же случаев достаточную точность дает использование расчетной схемы экипажа как системы абсолютно твердых тел, соединенных между собой линейными или нелинейными элементами с рассеянием энергии.

Именно такая расчетная схема экипажа принята в настоящей работе. Объектом исследований выбран движущийся по неровностям пути четырехосный грузовой вагон, который можно представить системой трех твердых тел: кузова с наддресорными балками и двух тележек с колесными парами. Предполагается, что между кузовом и тележками установлены упругие элементы с демферами: 1. вязкого трения; 2. кулонова трения. Рельсо-шпальная решетка моделируется бесконечно длинной балкой с неровностями, лежащей на сплошном деформируемом

основании.

Основание железнодорожного пути представляет собой систему с распределенными параметрами. Для правильного определения сил взаимодействия подвижного состава и пути необходимо принимать во внимание как упруго-вязкие, так и инерционные свойства этой среды. Однако, реологические свойства реальных оснований далеки от свойств однородной и изотропной сплошной среды. Хорошее совпадение с экспериментом при решении задач о колебаниях балок, лежащих на упругом основании, получается при использовании двухпараметровых моделей основания, и в частности, технической модели, предложенной М.З.Власовым. В рамках этой модели достаточно просто учесть различные реологические и инерционные свойства материала основания.

Основание железнодорожного пути (рельсо-шпальной решетки) состоит из двух слоев: балластного слоя и земляного полотна, имеющих различные характеристики. Поэтому представлялось целесообразным учесть работу подрельсового основания при колебаниях системы "экипаж-путь" в рамках двухслойной модели Власова-Леонтьева.

При решении задачи о взаимодействии подвижного состава и пути могут рассматриваться как плоские (вертикальные), так и пространственные колебания системы "экипаж-путь". Пространственные расчетные схемы наиболее полно отражают колебательные процессы, происходящие в реальных системах. Однако, при такой постановке исследователи сталкиваются с серьезными трудностями, связанными прежде всего с учетом работы пути в пространственных условиях. Задача значительно упрощается, если рассматриваются лишь вертикальные (в продольной плоскости симметрии экипажа) колебания. При этом приходится принимать ряд допущений, наиболее серьезное из которых симметричность возмущений. Результаты решения плоской задачи

гут дать лишь нижнюю границу сил, действующих на кузов и колесные пары экипажа, так как при этом не учитывается боковая качка его элементов. Этот недостаток может быть компенсирован введением эквивалентного возмущения (увеличение глубины неровностей), и результаты решения приведены в соответствие с экспериментом.

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

При составлении математической модели приняты следующие допущения: неровности по обеим рельсовым нитям симметричны; связь между колесом и рельсом, а также между рельсом и основанием предполагается двухсторонней; материал основания подчиняется закону деформирования упруго-вязкого нерелаксирующего тела; между над-рессорными балками и боковинами тележек вдоль вагона зазоров нет (в этом случае движение вагона описывается семью обобщенными координатами, в качестве которых приняты абсолютные перемещения твердых тел).

Для решения задачи о колебаниях дискретно-континуальной системы "экипаж-путь" используется гипотеза Петрова-Шахунянца о подобии упругой линии балки, лежащей на упругом основании, при динамическом и квазистатическом нагружениях. Это позволяет выразить перемещения всех точек балки и, следовательно, поверхности основания через перемещения точек контакта рельса с колесом посредством предварительно найденной функции влияния прогибов. Характерной особенностью модели основания Власова-Леонтьева является возможность выразить перемещения в любой точке основания через перемещение находящейся на той же вертикали точки поверхности основания (функции распределения перемещений по глубине основания определя-

ются из экспериментальных исследований и принимаются одинаковыми во всех поперечных сечениях).

Таким образом, удается выразить перемещения всех точек балки и основания через перемещения колесных пар. Это приводит к тому, что учет инерционных и упруго-вязких свойств основания не изменяет структуру дифференциальных уравнений вынужденных колебаний экипажа и отражается лишь на численных значениях коэффициентов этих уравнений.

Дифференциальные уравнения колебаний составляются для выбранных обобщенных координат как уравнения Лагранжа второго рода. Неровность пути вводится как разность между перемещениями точки контакта колеса с рельсом и прогибом рельса в этой точке.

Предварительно решена вспомогательная задача об определении функции влияния прогибов пути - реакции идеальной бесконечной балки, лежащей на упруго-вязком инерционном двухслойном основании, на единичное вертикальное перемещение под постоянной силой, движущаяся равномерно вдоль оси пути. Дифференциальные уравнения движения основания получены, исходя из выражения для виртуальной работы внешних и внутренних сил, действующих на элементарный отолбик, вырезанный из основания. Порядок системы уравнений совместных колебаний балки и основания при многослойной модели основания (по Власову-Леонтьеву) равен $2N + 2$, где N - число слоев, т.е. шести в рассматриваемом случае. С помощью разрешающей функции система уравнений сводится к одному дифференциальному уравнению шестого порядка, однородному на всей оси за исключением начала координат (задача решается в подвижной системе координат, начало которой совмещено с точкой приложения движущейся силы). По виду корней характеристического уравнения строится решение для разрешающей функции, а затем обратным переходом и для искомым функций, описывающих перемещения I и II слоев основания. Решения имеют различные

выражения для положительной и отрицательной полуосей. Постоянные интегрирования определяются из условий сопряжения решений в начале координат. Несимметричность функции влияния прогибов (максимальный прогиб балки отстает от вызвавшей его подвижной нагрузки) обусловлена учетом трения в основании.

Кинетическая и потенциальная энергии балки и основания, а также функция рассеяния энергии в основании выражаются посредством функции влияния прогибов через перемещения точек контакта "колесо-рельс", а затем через обобщенные координаты, принятые для описания движения вагона. Кинетическая энергия вагона вычисляется по теореме Кенига, а потенциальная энергия - по теореме Клапейрона. При составлении уравнений трение в демпферах вагона предполагается вязким.

Дифференциальные уравнения колебаний системы "экипаж-путь" получены в виде:

$$A\ddot{\bar{q}} + R\dot{\bar{q}} + C\bar{q} = \bar{Q}(\bar{\eta}, \dot{\bar{\eta}}, \ddot{\bar{\eta}}),$$

где A , R и C - матрицы инерционных, диссипативных и квазиупругих коэффициентов; \bar{q} - вектор обобщенных координат; \bar{Q} - вектор соответствующих обобщенных сил, определяемый неровностями пути и их производными.

Коэффициенты дифференциальных уравнений при обобщенных координатах, скоростях и ускорениях тележек, содержат динамические составляющие, зависящие от параметров пути и скорости движения экипажа. Несмотря на соответствующий выбор обобщенных координат, уравнения подпрыгивания и галопирования тележек оказываются связанными вследствие неосимметричности функции влияния прогибов.

В третьей главе работы приводится методика определения параметров математической модели исследуемой системы.

НТБ
ДНУЖТ

Расчетные параметры должны быть получены, исходя из экспериментальных исследований. Вследствие трудности определения некоторых характеристик модели основания, например распределительной способности (в глубину), немногочисленности подобных экспериментов и большого разброса определяемых экспериментально параметров, необходимости введения эквивалентных характеристик, связанной с несовершенством расчетной схемы, часть параметров может быть определена расчетным путем из результатов более простых и надежных экспериментов.

Одной из важнейших и в настоящее время наиболее полно изученной характеристикой железнодорожного пути является его вертикальная жесткость. Поэтому в работе предложена методика определения параметров математической модели пути по экспериментальным данным о его жесткости. Получены формулы, связывающие жесткость пути с параметрами основания для винклеровской, однослойной и двухслойной (по Власову-Леонтьеву) моделей. Для однослойной модели приведены зависимости между модулем упругости и коэффициентом затухания перемещений по глубине основания при различных значениях жесткости пути. Отмечено, в частности, что при значении модуля упругости

$E_0 = 30 \text{ Мнм}^{-2}$ величина коэффициента затухания перемещений для пути на железобетонных шпалах ($K_n = 80 - 120 \text{ Мнм}^{-1}$) хорошо согласуется с результатами эксперимента, выполненного лабораторией МИИТа ($\gamma = 0,7 - 1,1 \text{ м}^{-1}$).

Для двухслойной модели определены диапазоны изменения расчетных параметров в зависимости от конструкции гуты (деревянные, железобетонные шпалы, железобетонные блоки, насыпь, выемка), его состояния и времени года (зима, лето). Оценено влияние на жесткость пути различных параметров: модулей упругости и толщины слоев подрельсового основания, коэффициентов затухания перемещений по глу-

бине и т.п. Отмечено, что на жесткость пути изменение параметров верхнего слоя оказывает большее влияние, чем нижнего.

Сопоставление результатов решения задачи о взаимодействии подвижного состава и пути при различных моделях подрельсового основания предложено проводить по условию равенства жесткости пути. Так, более сложная двухслойная модель может быть заменена однослойной. Для этого по заданным параметрам двухслойной модели достаточно определить жесткость пути и затем, задавшись одним из параметров однослойной модели, например модулем упругости, определить оставшийся параметр (коэффициент затухания перемещений).

Для определения коэффициентов трения в подрельсовом основании использована методика, основанная на сопоставлении экспериментально определенного запаздывания максимального прогиба рельса по отношению к точке контакта колесо-рельс с результатами расчета. Величина запаздывания максимального прогиба определяется как первый корень трансцендентного уравнения, полученного приравниванием к нулю первой производной по \mathcal{X} от функции влияния прогибов для отрицательной полуоси. Расчеты выполнены с помощью ЭЦВМ "Минск-22М". Используются экспериментальные данные, полученные путепытательной лабораторией ДИИТа.

В четвертой главе диссертации рассмотрены различные методы интегрирования дифференциальных уравнений колебаний исследуемой системы. Для случая демпферов вязкого трения в рессорном подвешивании (линейный вариант расчетной схемы) методом комплексных амплитуд получено решение задачи о колебаниях четырехосного вагона при движении по регулярным стыковым неровностям косинусоидальной формы.

Проведено преобразование уравнений к нормальной форме Коши, причем в правых частях выделен вектор сил трения в рессорных комп-

ИЗДАНИЕ
ДНУЖТ

лектах. Такое представление уравнений весьма удобно в связи с возможностью использования различных моделей сил трения в демпферах без изменения структуры уравнений.

Получены машинные уравнения и построена блок-схема решения задачи на АВМ.

Сформулированы принципы выбора методов интегрирования, рациональных для задач указанного класса, и программ, их реализующих на ЭЦВМ. Разработана блок-схема и составлена программа для ЭЦВМ "Минск-22М", реализующая уточненный метод Эйлера.

В пятой главе приведены результаты решения задачи о взаимодействии четырехосного грузового вагона и пути.

В диапазоне изменения скорости движения экипажа от 40 до 160 км/час исследовано влияние параметров пути на динамические добавки к коэффициентам дифференциальных уравнений колебаний системы "экипаж-путь". Величина этих добавок может служить первичным критерием влияния указанных выше параметров на колебания экипажа.

Оказалось, что модули упругости и толщина слоев, а также распределительная в глубину способность основания существенно влияют на величину динамических добавок, а значение коэффициента Пуассона практически не оказывает влияния на эти величины; приведенная масса и момент инерции пути соизмеримы с соответствующими величинами для тележек; за счет вовлечения в колебания подрельсового основания в зависимости от податливости земляного полотна формируется 50-80% приведенной массы пути, а 50-20% приходится на долю рельсо-стальной решетки; увеличение скорости движения от 40 до 160 км/час вызывает уменьшение приведенной массы пути не более чем на 15%, и увеличение приведенной жесткости - на 5%.

В рамках принятой расчетной схемы исследованы вертикальные колебания четырехосного грузового вагона, загруженного до полной

грузоподъемности, при движении по детерминированным периодически повторяющимся неровностям пути косинусоидальной формы в зависимости от параметров пути и скорости движения экипажа.

Отмечено, что наибольшие значения динамических усилий в ресорных комплектах в случае демпферов вязкого трения возникают в пределах неровности, а при кулоновом трении в демпферах — и за ее пределами. С увеличением жесткости пути силы, действующие на кузов экипажа, увеличивается при скорости движения свыше 100 — 120 км/час, а при меньших скоростях мало зависят от жесткости пути. На величину этих сил не оказывают влияния инерционные и диссипативные характеристики подрельсового основания. С ростом скорости движения наблюдается тенденция увеличения сил. В рассматриваемом диапазоне изменения скоростей экстремальные значения сил, действующих в ресорных комплектах, при демпферах кулонова трения выше, чем при вязком трении. При глубине неровности 0,01 м расчетные значения сил при демпферах кулонова трения удовлетворительно согласуются с данными натурных испытаний.

Максимальные разгружающие усилия на контакте "колесная пара — рельс" действуют при входе колеса на неровность и в конце ее, а наибольшее догружающее усилие возникает при прохождении колесом средней части неровности. Вне пределов неровности частота колебаний определяется собственной частотой галопирования кузова.

Вследствие несимметричности функции влияния прогибов уровень сил, действующих на первую и вторую колесные пары тележек, не одинаков. Экстремальные усилия имеют более высокие значения для первой колесной пары.

Изменение параметров подрельсового основания, вызывающее увеличение жесткости пути, приводит к увеличению сил взаимодействия, причем, изменение параметров верхнего слоя оказывает относительно

большее влияние на величину сил, чем соответствующее изменение параметров земляного полотна. Так, увеличение модуля упругости верхнего слоя с 10 до 50 Мнм^{-2} приводит к увеличению сил взаимодействия при скорости движения 120 км/час на 15-30%, а изменение модуля упругости нижнего слоя в тех же пределах - не более, чем на 5%; увеличение толщины динамически активного слоя земляного полотна с 3 до 5 м эквивалентно (в смысле снижения сил взаимодействия) увеличению толщины балласта с 0,2 до 0,5 м.

Учет работы балластного слоя в рамках двухслойной модели подрельсового основания существенно влияет на величину сил взаимодействия подвижного состава и пути. При наличии балластного слоя толщиной 0,5 м уровень сил взаимодействия снижается на 15-35% по сравнению с результатами расчетов на однослойном основании. Однако, из-за громоздкости вычислений в случае двухслойной модели основания, расчеты можно производить для однослойной модели, предварительно определив ее параметры с учетом характеристик балластного слоя.

При увеличении коэффициентов трения в материале подрельсового основания силы взаимодействия уменьшаются тем больше, чем выше скорость движения.

Учет инерционных свойств подрельсового основания приводит к увеличению сил, действующих на колесные пары экипажа, на 5-10% при скорости движения от 80 до 160 км/час.

С ростом скорости движения динамические составляющие сил взаимодействия весьма интенсивно нарастают, достигая при движении по неровности глубиной 0,01 м со скоростью 160 км/час 60% от статического давления на колесную пару.

При глубине неровности 0,012-0,015 м результаты расчета хорошо согласуются с результатами натурных испытаний.

НИИ
ДНУЖТ

ВЫВОДЫ

Разработана методика определения сил, действующих на кузов и колесные пары рельсового экипажа при движении по детерминированным неровностям упруго-вязкого инерционного пути с двухслойным подрельсовым основанием.

Решена вспомогательная задача об определении функции влияния прогибов пути при двухслойной (по Власову-Леонтьеву) модели подрельсового основания.

Для решения задачи о колебаниях дискретно-континуальной системы "экипаж-путь" использованы свойства модели Власова-Леонтьева и применена гипотеза Петрова-Шахуняца, что позволило сохранить для системы "экипаж-путь" структуру дифференциальных уравнений колебаний экипажа.

Разработана методика определения параметров математической модели подрельсового основания по экспериментальным данным о жесткости пути. По этому же принципу предложено устанавливать соответствие между различными моделями основания железнодорожного пути.

Произведена оценка влияния параметров балки и основания на приведенные характеристики пути. Отмечено, в частности, что 50-80% приведенной массы пути формируется за счет вовлечения в колебания подрельсового основания, а 50-20% приходится на долю рельсо-шпальной решетки.

С помощью ЭЦВМ исследованы вертикальные колебания четырехосного грузового вагона, движущегося по детерминированным стыковым неровностям пути косинусоидальной формы, в диапазоне изменении скорости движения от 40 до 160 км/час. Показано, что силы, дейст-

РАТБ
ДНУЖТ

вующие на кузов вагона, при скорости движения до 100-120 км/час практически не зависят от параметров пути. Характеристики пути и скорость движения экипажа существенно влияют на величину сил взаимодействия. Изменение параметров пути, приводящее к увеличению его жесткости, приводит к росту сил. С увеличением скорости движения динамические составляющие сил взаимодействия весьма интенсивно нарастают, достигая при скорости 160 км/час 60% от статического давления, передаваемого колесной парой на путь.

При решении задачи о взаимодействии подвижного состава и пути необходимо учитывать работу балластного слоя в рамках двухслойной модели основания. При использовании более простой однослойной модели необходимо соответствующим образом определять ее параметры по предлагаемой методике.

Результаты расчетов хорошо согласуются с данными натурных испытаний.

Разработанная методика исследования вертикальных колебаний рельсовых экипажей позволяет значительно уточнить расчеты для конкретных участков пути и может быть использована при исследовании динамики новых типов подвижного состава, предназначенных для высокоскоростного движения.

48/3a

НТБ
ДНУЖТ

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Плоская задача о колебаниях экипажа, движущегося по балке, лежащей на упруго-вязком инерционном основании. В сб. "Вопросы динамики подвижного состава и применения математических машин". Труды ДИИТа, вып.128, Днепропетровск, 1972.
2. Вынужденные колебания четырехосного грузового вагона при движении по неровностям инерционного упруго-вязкого пути. В кн. "Материалы 33 научно-технической конференции Брянского института транспортного машиностроения". Брянск, 1972.
3. Определение сил, действующих на рельсовый экипаж при движении по инерционному пути. В сб. "Некоторые задачи механики скоростного рельсового транспорта". Киев, "Наукова думка", 1973.
4. О моделях для исследования взаимодействия подвижного состава и пути. В кн. "Повышение эксплуатационной надежности локомотивов в условиях дорог Урала и Сибири". Омск, 1973 (в соавторстве с В.А.Лазаряном и др.).
5. О влиянии параметров пути на коэффициенты дифференциальных уравнений колебаний экипажа. В сб. "Переходные режимы движения и колебания подвижного состава". Труды ДИИТа, вып.143, Днепропетровск, 1973.

НТБ
ДНУЖТ

Материалы диссертации доложены

1. На 33 научно-технической конференции Брянского института транспортного машиностроения, Брянск, 1972.
2. На совещании "Некоторые задачи механики скоростного рельсового транспорта", Днепропетровск, 1972.
3. На юбилейной научно-технической конференции Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, Днепропетровск, 1972.
4. На сетевой научно-технической конференции "Динамика и меры повышения эксплуатационной надежности локомотивов в условиях железных дорог Урала и Сибири", Омск, 1972.
5. На симпозиуме "Проблемы моделирования динамики подвижного состава", Брянск, 1973.
6. На семинаре по механике Днепропетровского отделения Института механики АН УССР и Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, Днепропетровск, 1973г.

НТБ
ДНУЖТ

БГ 22229.Подписано к печати II/Х-73г.І,2 п.л.Зак.150 т.150
ПОМ треста "Днепрогеофизика, ул.В.Дубинина, 8 .

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ
ДНУЖТ