

МПС - СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

Е.Л. Стамблер

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
КОЛЕБАНИЙ И КВАЗИРАВНОВЕСИЯ СТАЦИОНАРНО
ДВИЖУЩИХСЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПОВЕЗДОВ

(05.433. Подвижной состав и тяга поездов)

А в т о р е ф е р а т

диссертации, представленной на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Днепропетровск
1970

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта. Эксперименты проводились на Закавказской железной дороге .

Научный руководитель -

заслуженный деятель науки УССР ,
член-корреспондент АН УССР ,
доктор технических наук, профессор В.А. Лазарян .

Официальные оппоненты :

доктор технических наук, профессор С.В. Вершинский
кандидат технических наук, ст.научный
сотрудник С.И. Конашенко .

Ведущая организация - Всесоюзный научно-исследовательский институт вагоностроения .

Автореферат разослан 25 января 1971 г.

Защита диссертации состоится 6 марта 1971 г.
на заседании Ученого совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (г. Днепропетровск, 10, ул. Университетская, 2) .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзыв просим направлять в двух экземплярах по адресу:
г. Днепропетровск, 10, ул. Университетская, 2, Институт инженеров железнодорожного транспорта.

Ученый-секретарь Совета,
кандидат технических наук,
доцент Б.М. Климовский

МПС - СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

Б.Д. Стамблер

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
КОЛЕБАНИЙ И КВАЗИРАВНОВЕСИЯ СТАЦИОНАРНО
ДВИЖУЩИХСЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПОЕЗДОВ

(05.433. Подвижной состав и тяга поездов)

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

Днепропетровск
1970

439/9

На железнодорожном транспорте страны интенсивно растут веса грузовых железнодорожных поездов. Как показывают расчеты экономистов, увеличение веса поезда является наиболее эффективным способом дальнейшего увеличения пропускной и провозной способности железных дорог .

Внедрение электрической тяги, создание мощных локомотивов и большие возможности по использованию кратной тяги, по существу, сняли ограничения веса поезда по мощности локомотива. Представляет интерес выяснить, какие иные ограничения наложены на вес грузового поезда .

До недавнего времени интенсивно изучались, главным образом, ограничения, обусловленные прочностью вагонов при переходных режимах движения поезда. В работах Н.Е. Жуковского, А.М. Годыцкого-Цвирко, В.А. Лазаряна, Ф.В. Флоринского, С.В. Вершинского и других авторов получены аналитические и экспериментальные решения задач этого типа. Вместе с тем оказалось, что указанные ограничения не являются единственными

При движении тяжеловесного поезда в стационарном тяговом режиме на вагоны, включенные в поезд, действуют значительные растягивающие усилия. Большие стационарные сжимающие продольные силы могут возникать в режиме рекуперативного (реостатного) торможения, а также в режиме толкания.

В работе показано, что при действии значительных продольных сил колебания различных вагонов поезда оказываются связанными, что приводит к необходимости в ряде случаев рассматривать колебания всего поезда как одной механической системы. В качестве первого шага естественно выяснить влияние продольных сил на час-

тоты и формы собственных пространственных колебаний грузового поезда . При этом удается решить задачу об устойчивости движения поезда (в смысле Ляпунова), что позволяет прогнозировать динамические качества экипажей, включенных в поезд. В рассматриваемой постановке задачи оказывается возможным исследовать устойчивость квазиравновесия поезда (в смысле Эйлера) и определить критические значения продольных сжимающих сил. При решении ряда квазистатических задач вычисляются вызванные продольными силами усилия в элементах рессорного подвешивания, величины которых определяют устойчивость экипажей (в смысле схода с рельсов).

Оказалось, что условия безопасности движения поезда накладывают ограничения на величины стационарных продольных сил, действующих в поезде.

Первыми это обнаружили на примерах ряда сходов и крушений железные дороги, эксплуатирующие горные участки, где поезда сравнительно изобольшого веса являются тяжеловесными из-за значительных уклонов. Они и выступили инициаторами специальных исследований динамики стационарно движущихся тяжеловесных поездов.

В 1966 г. Всесоюзным научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (ВНИИЖТом) на Львовской ж.д.

и Днепропетровским институтом инженеров железнодорожного транспорта (ДИИТом) на Закавказской ж.д.

были поставлены первые эксперименты по этой проблеме. Эксперименты ДИИТа на Сурамском перевале, проведенные при участии автора, явились началом настоящей работы .

Опыты позволили выявить некоторые качественные особеннос-

ти, присущие стационарно движущимся тяжеловесным грузовым поездам, получить основные предпосылки к выбору расчетной схемы, а также экспериментальные данные для контроля некоторых результатов, полученных аналитически .

В опытных поездках сцеп из 7 порожних полувагонов вместе с вагоном-лабораторией включался в головную часть тяжеловесных поездов, следовавших через Сурамский перевал. При проведении опытов на одном из полувагонов сцепа велись измерения, обычные для экспериментального исследования колебаний одиночного экипажа, а также измерения продольных усилий в автосцепках полувагона и некоторых других величин. В опытных поездках проводилось также фотографирование взаимного положения осей вагонов в режимах тяги и рекуперативного торможения .

В результате обработки осциллограмм вертикальных сил и перемещений выяснено, что кузов вагона поезда, стационарно движущегося по прямой, может иметь постоянные во времени перемещения, зависящие от величины продольного усилия. При значительных продольных силах эти перемещения опасны, так как вызванные ими обезгруживания рессорных комплектов могут привести к сходу колесной пары легковесного вагона с рельсов .

При сравнении спектральных плотностей осциллограмм вертикальных сил F рессорном комплекте вагона, записанных при движении поезда на выбеге и в тяговом режиме, было обнаружено существенное различие спектров .

Анализ фотографий взаимного положения осей вагона при движении поезда показал, что в режиме рекуперативного торможения вагоны занимают положение наибольшего перекресса в колес, причем

углы поворота всех вагонов оказываются одного знака

При анализе осциллограмм продольных сил, записанных при переходных режимах движения тяжеловесных поездов, оказалось, что в указанных режимах возможны ситуации, близкие к рассмотренным стационарным режимам движения поезда, когда продольные силы в соседних сечениях поезда достигают значительных величин практически одновременно и действуют в течение длительных промежутков времени. В опытах по пневматическому торможению неоднородного поезда весом 10 тыс. тонн (его испытания проводились ВНИИЖТом и ДИИТом) был зарегистрирован опытный факт, аналогичный обнаруженному при стационарном режиме рекуперативного торможения, касающийся формы потери устойчивости сцепа порожних полувагонов в горизонтальной плоскости. (Сцеп осматривался и фотографировался после остановки поезда.)

Динамическая модель поезда строится в виде натянутой (сжатой) продольными силами одномерной цепочечной системы, каждый элемент которой - одиночный вагон поезда - соединен с соседними посредством жестких невесомых стержней, шарнирно прикрепленных к кузовам экипажей.

Динамическая модель каждого экипажа принимается такой же, какой она принята при исследовании собственных пространственных колебаний одиночного экипажа.

Исследованиям динамики одиночного экипажа посвящены работы Н.Б. Жуковского, А.М. Годыцкого-Цвирко, М.В. Винокурова, Н.А. Ковалева, В.А. Лазаряна, В.Б. Медея, М.Ф. Вериги, И.И. Челнокова, а также Марье, Картера, Рокара и других ученых.

Отметим, что простейшая модель поезда в виде совокупности

отдельных экипажей, сводящая задачу динамики поезда к задачам динамики одиночных экипажей, оказывается верной для большого числа возможных случаев. В частности, она верна для грузового поезда, движущегося на выезде. При этом, как правило, реализуется максимальная скорость движения, так что с позиций оценки максимальных скоростных характеристик поезда исследования динамики одиночных экипажей дают исчерпывающие результаты.

В работе приводятся данные, подтверждающие корректность рассматриваемой динамической модели пары сцепленных автосцепок, натянутой (сжатой) продольной силой, в виде жесткого стержня. Одни из них - результаты экспериментального исследования кинематики пары сцепленных автосцепок в режимах тяги и торможения, полученные в одной из работ И.М.Коротеева и Г.Т.Литвинова, другие - результаты теоретического исследования по определению зоны анкилозиса поглощающих аппаратов Ш-I Т при действии постоянной силы, приведенные в одной из работ В.А. Лазаряна и Л.А. Манашкина.

Отмечается, что указанная модель пары сцепленных автосцепок использовалась в работе С.В.Вершинского, в которой рассмотрена плоская задача о растяжении (сжатии) сцепа из двух вагонов.

С помощью построенной динамической модели поезда дается качественное объяснение упомянутому выше опытному факту, касающегося существенных различий спектров вертикальных сил в рессорном подвешивании вагона поезда для случаев отсутствия и наличия силы тяги. Ниже с помощью построенной динамической модели дано объяснение и другим приведенным выше опытным данным.

Если число степеней свободы каждого экипажа $\kappa + 1$, число экипажей в поезде $\lambda + 1$, то, составляя уравнения связей, находим, что число степеней свободы системы равно $\kappa(\lambda + 1) + 1$

Дифференциальные уравнения движения, составленные как уравнения Лагранжа II рода, образуют систему, состоящую из обыкновенного дифференциального уравнения для циклической координаты и системы дифференциально-разностных уравнений для позиционных координат, которая после исключения циклической координаты и разрыва вестма малых динамических связей имеет вид

$$[A_i] \ddot{q}_i + [B_i] \dot{q}_i + [C_i] q_i = \bar{Q}_i, \quad (I)$$

где $[A_i]$, $[B_i]$, $[C_i]$ - матрицы коэффициентов уравнений движения для позиционных координат i -го вагона поезда, \bar{q}_i - вектор этих координат, а \bar{Q}_i - вектор обобщенных сил, ненулевые элементы которого соответствуют координатам, описывающим колебания кузова i -го вагона, и зависят от координат, продольных сил, приложенных к i -у вагону (S_i, S_{i-1}), длины соединительных стержней (a), длин экипажей между точками прикрепления соединительных стержней ($2b_i$) и высот центров тяжести кузовов над этими точками (h_{i1})

Анализ обусловленных продольными силами коэффициентов связи и связанности координат показал, что колебания соседних различных или различно загруженных экипажей можно считать независимыми даже в режиме интенсивной тяги или рекуперативного торможения, в связи с чем в дальнейшем рассматриваются лишь однородные поезда и однородные сцепы вагонов в неоднородных поездах. Упомянутый анализ показал также, что в первом приближении можно пренебречь связями разноименных координат, описывающих ко-

лебания кузовов вагонов. Если далее выбрать специальное правило знаков для угловых перемещений кузовов в вертикальной и горизонтальной плоскостях и несколько ограничить круг рассматриваемых задач, то исходные уравнения (I) преобразуются в общем случае к 5 идентичным системам к дифференциально-разностных уравнений вида

$$[A]\bar{q}_i + [B]\bar{q}_i + [C]\bar{q}_i = \Delta \left(\chi \frac{S_i}{a} \Delta \bar{q}_i \right), \quad (2)$$

где $\Delta \bar{q}_i$ - исходящая разность вектора обобщенных координат, содержащая единственную z -ю ненулевую составляющую. Причем в качестве уравнения для z -й координаты q_{iz} в системе вида (2) входят соответственно уравнения для координат подпрыгивания ($\chi = 1$), продольной качки ($\chi = b^2$), поперечной качки ($\chi = h_1^2$), бокового отбоя ($\chi = 1$) и виляния ($\chi = b^2$) кузовов вагонов поезда.

Отметим, что при нулевых правых частях ($S_i = 0$) системы уравнений вида (2) представляют собой системы уравнений для позиционных координат одиночного вагона поезда. При этом предполагается, что математическая модель одиночного экипажа может быть представлена в виде, при котором уравнения для всех координат, описывающих колебания кузова, не связаны между собой. Рассмотрены два пути получения таких моделей, основанные на некотором ограничении круга рассматриваемых задач. Использован также такой путь перехода от системы (I) к системам вида (2), при котором в первом приближении разрываются связи координат поперечной качки кузовов различных вагонов поезда.

Разделив систему уравнений вида (2) на Ω , рассматри-

взем ее как конечно-разностную аппроксимацию системы уравнений в частных производных вида

$$\frac{1}{\alpha} \left([A] \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial t^2} + [B] \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + [C] v \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\chi S(x) \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right], \quad (3)$$

где \bar{v} - вектор обобщенных координат, а $\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}$ - его производная по пространственной координате, содержащая единственную τ -ю ненулевую составляющую.

Если не принимать во внимание упругость пути, то уравнения колебаний поезда в вертикальной продольной плоскости симметрии и уравнение крутильных колебаний имеют вид следующего одиночного дифференциально-разностного уравнения

$$a^* \ddot{q}_i + c^* q_i = \Delta \left(\chi \frac{S_i}{\alpha} \Delta q_i \right), \quad (4)$$

а его непрерывный аналог представляет собой известное обобщенное уравнение колебаний струны

$$\frac{1}{\alpha} \left(a^* \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + c^* v \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\chi S(x) \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (5)$$

В работе рассмотрены различные методы решения одиночного дифференциально-разностного уравнения (4).

В случае, когда рассматриваются колебания короткого сцепа, находящегося в головной части тяжеловесного поезда, можно пренебречь изменением натяжения по длине сцепа и использовать аналитическое решение уравнения (4), полученное А.И. Лурье двукратным преобразованием Лапласа обычных и ступенчатых функций.

При умеренно большом числе вагонов в поезде (сцепе) уравнение (4) разворачивается в систему обыкновенных дифференциальных уравнений, и задача сводится к проблеме собственных чисел и собственных векторов матрицы, решаемой с помощью ЭЦВМ.

В последнем случае может быть использовано также электрическое моделирование задачи. Электрические модели построены на базе RLC - модели по одной из форм II системы электромеханических аналогий (особенно удобной при исследовании вынужденных колебаний от кинематических возмущений), а также (для определения собственных частот с помощью приема сдвига корней) - по I системе аналогий.

При весьма большом числе вагонов в поезде для оценки решений уравнения (4) использованы решения уравнения в частных производных (5), полученные методом Фурье. У однородного поезда натяжение линейно изменяется по длине. Тогда уравнение форм колебаний является частным случаем уравнения Бесселя. Для граничных условий общего вида характеристическое уравнение для определения собственных чисел задачи выражается через функции Бесселя I и II рода нулевого и первого порядка и решается с помощью ЭЦВМ.

Для всех случаев формула для определения частот имеет вид

$$\nu_m = \sqrt{\nu_0^2 + \frac{\lambda S}{\alpha \alpha^*} \tilde{\lambda}_m} \quad (m=1, 2, \dots, n), \quad (6)$$

где $\nu_0^2 = \frac{c^*}{\alpha^*}$ - парциальная частота S - продольная сила в головном сечении поезда (сцепы), а $\tilde{\lambda}_m$ - собственные числа дискретной краевой задачи отыскиваемые описанными выше методами.

В случае рекуперативного (реостатного) торможения или толкания ($S < 0$) возможен случай, когда $\nu_m = 0$, что соответствует потере устойчивости квазиравновесия поезда (в смысле Эйлера), откуда легко находится спектр критических значений

сжимающей продольной силы, действующей в головном сечении поезда (сцепа)

$$S_m = \frac{c^* a}{\lambda \lambda_m} \quad (7)$$

Найденные решения одиночного дифференциально-разностного уравнения использованы для исследования колебаний поездов (сцепов) в вертикальной продольной плоскости симметрии и крутильных колебаний. В рассмотренных примерах спектры частот собственных колебаний образуют группы близких частот, лежащих вблизи парциальных (выше при тяге и ниже при рекуперативном торможении или толкании). Наибольшие отличия частот полной системы от парциальной получаются в случае сцепа, находящегося в неоднородном поезде, для колебаний продольной качки, и эти отличия тем больше, чем меньше вертикальная жесткость рессорных комплектов тележек. Для этого же случая получаются наименьшими найденные оценки критических сжимающих сил. Минимальные значения критических сил достаточно высоки и лежат выше современного уровня наибольших стадичарных продольных сил ($|S| \leq 100 \text{ т}$).

Вместе с тем для вагонов с мягким рессорным подвешиванием (например, для рефрижераторных секций) минимальная критическая сила попадает в диапазон динамических сил, которые могут возникать при торможении тяжеловесных поездов. Как отмечалось выше, при переходных режимах движения поезда возможны ситуации, родственные рассмотренным стационарным. С этой точки зрения рекомендуется избегать постановок групп вагонов с мягким рессорным подвешиванием в те части тяжеловесных грузовых поездов, где возможны значительные сжимающие продольные силы при торможениях.

Отметим, что полученные в работе низшие критические значения продольных сжимающих сил для сцепов вагонов согласуются со значениями критических сил, найденными при иных предпосылках и иным способом С.В. Вершинским .

Далее в работе получено решение системы К дифференциально-разностных уравнений вида (2) [системы К уравнений в частных производных вида (3)] . Решение непрерывной задачи проведено методом Фурье, решение дискретной задачи в частном случае $S = \text{const}$ получено с помощью двукратного преобразования Лапласа обычных и ступенчатых функций, а в общем случае - сведением λ - матрицы системы ПК обыкновенных дифференциальных уравнений, в которую развернута система вида (2), к прямой сумме n λ - матриц порядка K

При этом удается отыскать n независимых друг от друга групп координат по K координат в каждой. Комплексные частоты λ m -й группы ($m = 1, 2, \dots, n$) находятся из частотного уравнения вида

$$D(\lambda) + \frac{\lambda S}{\alpha} \tilde{\lambda}_m D_{22}(\lambda) = 0, \quad (8)$$

где $D(\lambda)$ - определитель λ - матрицы соответствующей задачи о колебаниях одиночного вагона поезда, $D_{22}(\lambda)$ - его 2 -й главный диагональный минор, $\tilde{\lambda}_m$ - собственные числа дискретной краевой задачи, которые находятся из решения одиночного дифференциально-разностного уравнения (уравнения в частных производных) описанными выше методами .

С помощью полученных решений показано, что упругостью пути можно пренебречь при определении частот собственных колебаний кузовов вагонов и критических значений продольных сжимающих сил .

Далее уравнения вида (8) использовались для решения задач о пространственных колебаниях поездов (цепов). Рассмотревались случаи, когда вагоны поездов при одиночном движении - как неустойчивые, так и устойчивые по Ляпунову (при определенных значениях параметров) механические системы.

Развертывание определителей в полиномы и отыскание корней полиномов производилось с помощью ЭЦВМ. Получены зависимости величин hT - инкрементов (декрементов) колебаний, определяющих устойчивость движения поезда (цепы) по Ляпунову, от продольной силы в головном сечении поезда (S), скорости движения и номера (m) тона колебаний.

Анализ указанных зависимостей показал, что величины hT определяющие устойчивость движения поезда (цепы) по Ляпунову, уменьшаются с ростом продольной силы, номера тона колебаний и снижением скорости движения.

Поскольку величины hT для первого тона колебаний поезда мало отличаются от величин hT для одиночного вагона, устойчивость движения поезда по Ляпунову в тяговом режиме определяется устойчивостью движения одиночного вагона поезда.

С помощью полученных зависимостей показано также, что сжимающие продольные силы, возникающие при рекуперативном (реостатном) торможении или толкании, дестабилизируют движение поезда (цепы), так что при устойчивых при одиночном движении вагонах поезд может оказаться неустойчивым, если величины продольных сжимающих сил в поезде превосходят (по модулю) критические значения.

Путем решения задачи о колебаниях того же сцепы из ?

повоженных полувагонов, с которыми проводились эксперименты, найдено объяснение описанного выше опытного факта, относящегося к форме потери устойчивости в горизонтальной плоскости сцепя, движущегося в головной части тяжеловесного поезда и подверженного действию сжимающих продольных сил .

Анализ полученных зависимостей $hT(S, m)$ показал также, что качество поезда как системы, в смысле быстроты затухания переходных процессов, выше в тяговом режиме и ниже в тормозном.

Построенная динамическая модель используется также для решения задач квазиравновесия . При этом отыскивается форма равновесия стационарно движущегося грузового поезда для того случая, когда начальные значения обобщенных координат (при $S_i = 0$) - начальные неправильности поезда - отличны от нуля . Ограничиваемся рассмотрением таких задач, когда нужно принимать во внимание лишь перемещения обрессоренных частей экипажей .

Математическая модель задачи получается с помощью принципа Лагранжа и имеет вид следующей системы разностных уравнений

$$[C_i](\bar{q}_i - \bar{q}_{ni}) = \bar{Q}_i, \quad (9)$$

где \bar{q}_i - вектор обобщенных координат, описывающих перемещения i -го экипажа, \bar{q}_{ni} - вектор начальных значений этих координат .

Развертывая (9) в систему алгебраических уравнений и решая ее, находим вектор изменений обобщенных координат

$$\bar{q}^* = ([C_*^{-1}] - [E])\bar{q}_n, \quad (10)$$

с его помощью - вектор \bar{F} сил, действующих на колесные пары поезда, а используя последний, - вектор \bar{h} коэффициентов запаса устойчивости против схода колесных пар с рельсов. Составляющие последнего находились по формуле, предложенной М.Ф.Вериго

В стохастической задаче, когда \bar{q}_n является случайным вектором с заданными статистическими характеристиками, отыскиваются векторы математических ожиданий и корреляционные матрицы случайных векторов \bar{q}^* , \bar{F} и \bar{h} . Причем в последнем случае необходимо разложить нелинейную функцию $\bar{h}(\bar{F})$ в ряд Тейлора в окрестности математических ожиданий аргументов, удержав в нем лишь линейные члены.

Для проверки полученного аппарата решена простейшая задача о растяжении (сжатии) сцепы из двух вагонов. Найденная зависимость вертикальной силы в рессорном подвешивании от продольной силы совпала с указанной зависимостью, полученной в упоминавшейся выше работе С.В.Вершинского иным способом.

В качестве примеров рассмотрены стохастические задачи о растяжении и сжатии сцепы из 7 полувагонов, находящегося в поезде.

В последней предварительно производилась проверка на особенность матрицы $[C_4]$ в (10), что соответствует решению задачи об устойчивости квазиравновесия. Проверка сведена к решаемой на ЭЦВМ проблеме собственных чисел некоторой матрицы, с помощью которых находят критические значения сжимающих сил. В работе на примере показано, что формула (7), найденная при упрощающих предположениях, хорошо оценивает наименьшее

значение критической силы.

Обращение и умножение матриц проводилось на ЭЦВМ. Анализ найденных корреляционных матриц случайного вектора изменений обобщенных координат показал, что теснота линейных связей составляющих, относящихся к различным вагонам сцепа, падает до нуля при удалении на 3 вагона в обе стороны от рассматриваемого.

В результате решения задач найдены зависимости статистических характеристик сил, действующих на колесные пары, и коэффициентов запаса устойчивости против схода колесных пар с рельсов от величины и знака продольной силы .

Сравнение найденной зависимости статистических характеристик вертикальных сил в рессорном подвешивании вагонов в тяговом режиме с описанными выше опытными данными показало их вполне удовлетворительное соответствие

С помощью найденных зависимостей получены оценки допускаемых значений стационарных продольных сил по условиям устойчивости против схода колесных пар порожних полувагонов с рельсов. Оказалось, что эти значения попадают в диапазон возможных значений стационарных продольных сил, возникающих в головной части тяжеловесных поездов .

В ы в о д ы

В работе поставлены и решены некоторые задачи о собственных пространственных колебаниях и квазиравновесии стационарно движущихся грузовых железнодорожных поездов. При этом :

- выполнено экспериментальное исследование ;

- построена пригодная для решения поставленных задач динамическая модель поезда ;
- получены уравнения движения системы ;
- рассмотрены различные методы решения одиночных дифференциально-разностных уравнений и одного типа систем дифференциально-разностных уравнений ;
- определены частоты и формы собственных колебаний поездов ;
- найдены критические значения продольных сжимающих сил и соответствующие им формы потери устойчивости ;
- сделан вывод о том, что потеря устойчивости квазиравновесия грузового поезда в вертикальных продольной и поперечных плоскостях не может иметь места при современном уровне стационарных продольных сил ;
- рекомендовано не ставить сцепы вагонов с мягким рессорным подвешиванием в те части тяжеловесного поезда, где могут возникать высокие динамические силы при торможении ;
- показано, что упругость пути не влияет на частоты собственных колебаний поезда и критические значения продольных сжимающих сил ;
- определены зависимости инкрементов (декрементов) колебаний, определяющих устойчивость движения поезда по Ляпунову, от величин продольной силы, скорости движения и номера тона колебаний ;
- установлено, что устойчивость движения поезда по Ляпунову в тяговом режиме определяется устойчивостью движения одиночного вагона поезда ;

- приведена методика определения критических сжимающих сил, при которых движение поезда, устойчивое по Ляпунову на выбеге, становится неустойчивым ;

- найдено объяснение опытного факта, относящегося к форме потери устойчивости в горизонтальной плоскости однородного сцепа порожних полувагонов при торможении поезда ;

- для рассматриваемой динамической модели получена математическая модель задачи о квазиравновесии поезда, имеющего начальные неправильности, и составлен матричный алгоритм определения статистических характеристик векторов изменений координат, сил и коэффициентов запаса устойчивости по заданным статистическим характеристикам случайного вектора начальных не-
правильностей ;

- отмечена удовлетворительная сходимость расчетной и экспериментальной зависимостей вертикальных сил в рессорном подвешивании от продольной силы ;

- получены оценки допускаемых значений стационарных продольных сил по условию устойчивости против схода колесных пар порожних полувагонов и отмечено, что такие силы могут возникать в головной части тяжеловесных поездов ;

- рекомендовано при технико-экономических расчетах по выбору веса поездов принимать во внимание ограничения не только по прочности вагонов, но и по безопасности движения, поскольку в ряде случаев эти ограничения могут оказаться более жесткими ;

- выяснено, что для смягчения указанных ограничений необходимо уменьшать начальные неправильности поезда ;

- отмечено, что использование составных поездов является

удачным техническим решением выявленных трудностей на пути дальнейшего повышения веса поездов

Основное содержание диссертации изложено в работах :

1. Лазарян В.А., Блохин Е.П., Стамблер Е.Л. Движение легковесных вагонов в составах тяжеловесных поездов .Труды ДИИТ, вып.76, "Транспорт", М., 1968 .
2. Стамблер Е.Л. О вынужденных поперечных колебаниях цепочки вагонов. Тезисы докладов первой Гэспубликанской конференции молодых ученых-железнодорожников, Днепропетровск, 1969 .
3. Лазарян В.А., Стамблер Е.Л., Вашурин Л.А. Моделирование колебаний струны. Тезисы докладов третьей Всесоюзной конференции по аналоговой вычислительной технике , М., 1969 .
4. Лазарян В.А., Стамблер Е.Л. О моделях для исследования поперечных колебаний поезда. Труды ДИИТ, вып.84, "Транспорт", М., 1970 .
5. Лазарян В.А., Стамблер Е.Л. О собственных пространственных колебаниях железнодорожного поезда. Материалы юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1970 .
6. Лазарян В.А., Стамблер Е.Л. Некоторые задачи о квазиравновесии стационарно движущегося железнодорожного поезда. Материалы юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1970 .
7. Лазарян В.А., Стамблер Е.Л. О собственных поперечных колебаниях и устойчивости форм равновесия поезда. Труды ДИИТ , вып.114, Днепропетровск, 1970 .

Отдельные результаты работы докладывались :

1. На семинаре „Новые задачи устойчивости движения" Научного совета по общей механике АН УССР , Киев, Институт механики АН УССР, 1970 .
2. На третьей Всесоюзной конференции по аналоговой вычислительной технике, Москва, МВТУ, 1969 .
3. На Всесоюзной конференции по развитию транспортной сети экономических районов и повышению скорости движения поездов, Днепропетровск, ДИИТ, 1969 .
4. На первой Республиканской конференции молодых ученых-железнодорожников, Днепропетровск, ДИИТ, 1969 .
5. На юбилейной научно-технической конференции ДИИТа , Днепропетровск, ДИИТ, 1970 .
6. На семинаре по механике ДИИТа, Днепропетровск, ДИИТ, 1970 .

Подписано к печати 16/ХП-7Ст.БТ-28716

Заказ 371 Тираж 220 Объем 1,25 п.л.
Ротапринт ДИИТа Днепропетровск 1970 г.