

Г78  
8163  
МПС—ГУУЗ

Днепропетровский институт инженеров  
железнодорожного транспорта имени М.И. Калинина

---

ГРАЧЁВ В.Ф.

629.452

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ  
КОЛЕБАНИЙ СОЧЛЕНЕННЫХ ПОЕЗДОВ**

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

Днепропетровск 1974

НТБ  
ДНУЖТ  
✓

На правах рукописи

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
имени М.И.КАЛИНИНА

Грачев Валерий Федорович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ  
СОЧЛЕНЕННЫХ ПОЕЗДОВ

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-1974

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

НТБ  
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском отделении Института  
механики АН УССР

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки  
УССР, академик АН УССР, док-  
тор технических наук, профес-  
сор В.А.ЛАЗАРЯН

Официальные оппоненты:

доктор технических наук ЛЬВОВ А.А.,  
кандидат технических наук, доцент САВЧУК О.М.

Ведущая организация: Калининский ордена Ленина  
вагоностроительный завод

Автореферат разослан " 14 " октября 1974 г.

Защита диссертации состоится " 14 " ноября 1974 г.  
на заседании Ученого Совета Днепропетровского института  
инженеров железнодорожного транспорта (г.Днепропетровск, Ю,  
ул.Университетская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
института.

Ученый секретарь Совета  
кандидат химических наук

(ПЛАХОТНИК В.Н.)

Необходимость осуществления массовых пассажирских перевозок со скоростями выше 200 км/ч выдвигает перед учеными, конструкторами и инженерами целый комплекс проблем, в том числе и создание новых конструкций подвижного состава. Обладая хорошими ходовыми качествами, такой подвижной состав должен превосходить существующий по технико-экономическим показателям, а его внедрение не должно требовать значительных капиталовложений. Последнее условие практически выполнимо только при возможности использования нового подвижного состава на существующем или незначительно реконструированном рельсовом пути.

Как показывает зарубежный опыт последних лет, перечисленным выше требованиям в значительной мере отвечают сочлененные поезда, обладающие рядом преимуществ по сравнению с традиционными конструкциями подвижного состава. Широкое использование за рубежом сочлененных поездов обусловливается такими очевидными их преимуществами как сокращение веса конструкции, уменьшение величины необрессоренных масс и количества деталей ходовой части, снижение сопротивления движению и др.

Исследование устойчивости движения сочлененных вагонов, проведенное в лаборатории динамики и прочности подвижного состава ДИИТа, показало, что динамические качества одиночного двухосного и сочлененных вагонов с точки зрения устойчивости практически одинаковы. Следовательно, решающим фактором при выборе конструкции экипажа могут оказаться вопросы взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути, приобретающие особое значение с увеличением скоростей движения. Без решения проблемы взаимодействия невозможно осуществить многие технические мероприятия, направленные на обеспечение безопасности движения поездов и снижение расходов по содержанию вагонов и пути при высокоскоростном движении.

К исследованию динамики сочлененных поездов целесообразно применить общие методы динамики транспортных экипажей, теоретические основы которых заложены в работах А.М.Годыцкого-Цивирко, Н.Е.Жуковского, А.Н.Крылова, Г.Марье, А.П.Петрова, С.П.Тимошенко и др.

Серьезные исследования в области взаимодействия подвижного состава и пути выполнены советскими и зарубежными учеными: М.Ф.Вериго, С.В.Вершинским, М.В.Винокуровым, Л.О.Грачевой, В.Н.Даниловым, А.А.Камаевым, А.Я.Коганом, Н.Н.Кудряцевым, С.М.Купченко, А.А.Львовым, Б.В.Меделем, М.М.Филоненко-Бородичем, А.П.Филипповым, М.А.Фришманом, И.И.Челноковым, Л.А.Шадуром, Г.М.Шахуняицем, В.Ф.Яковлевым, Ф.Барвеллом, Ф.Бирманом, А.Де Патером, А.Уиккенсом и др.

Значительным вкладом в область исследования динамики подвижного состава явились работы В.А.Лазаряна и его учеников.

Как показано в этих работах, рассмотрение колебаний единой системы "экипаж-путь", а также использование в качестве модели основания технической модели Власова-Леонтьева, позволяющей весьма просто учесть упругие, инерционные и диссипативные свойства подрельсового обновления (что особенно важно для высокоскоростных экипажей), приводит к хорошему совпадению результатов аналитических исследований существующих типов подвижного состава с данными натурных испытаний. Это позволяет экстраполировать разработанную методику для исследования вновь проектируемых конструкций высокоскоростных экипажей, к которым можно отнести и сочлененные поезда. Правомерность такой экстраполяции полностью подтверждена натурными испытаниями скоростного вагона-лаборатории (СВЛ) с реактивной тягой.

Вынужденные колебания рельсовых экипажей обусловлены



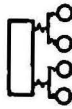



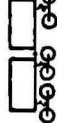
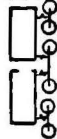
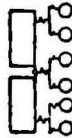
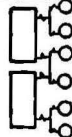






возмущениями, вызванными неровностями рельсов и кругов катания колес, а также неравномерностью пути, которые, как правило, носят случайный характер. В то же время наибольшие возмущения действуют на экипаж с постоянной (при данной скорости движения) частотой, определяемой длиной рельсовых звеньев. Как показывает спектральный анализ, даже на бесстыковом пути вследствие несовершенства сварки рельсовых звеньев в плети и остаточной неравноупругости подрельсового основания возмущения с такими частотами являются доминирующими. Поэтому целесообразно рассматривать колебания сочлененных поездов, возникающие при движении по пути как с детерминированными, так и со случайными неровностями.

Теоретическим исследованиям динамики сочлененных поездов посвящено сравнительно небольшое число работ. Оценивая эти работы, следует отметить, что вопросы вертикальной динамики изучены далеко не полностью, в частности:

- 1) рассмотрены упрощенные расчетные схемы, не учитывающие деформацию железнодорожного пути при колебаниях единой механической системы "сочлененный поезд-путь";
- 2) не проведена оценка влияния параметров экипажей и пути на колебания сочлененных поездов;
- 3) не рассмотрено многообразие схем сочленения, не проведено сопоставление поездов с точки зрения плавности хода и динамического воздействия на путь.

Устранение указанных недостатков в исследовании колебаний сочлененных рельсовых экипажей и является целью реферируемой работы. В качестве объекта исследования выбраны конструкции, схемы которых представлены в таблице.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения.

Число элементов в-до базиса	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З
1								
2								
3								
4								
5								
Число элементов базиса	$2n+1$			$3n+1$		$2n+3$	$5n+1$	$3n+5$

Первая глава реферируемой работы посвящена построению математической модели вертикальных колебаний системы "сочлененный поезд-путь". Вагоны рассматриваются как твердые тела с упруго-вязкими соединениями, а железнодорожный путь представляется бесконечно длинной балкой, лежащей на упруго-вязком инерционном основании. В качестве модели подрельсового основания принимается модель Власова-Леонтьева с двумя характеристиками.

Для приближенного решения задачи о колебаниях системы "экипаж-путь" используется методика, разработанная В.А.Лазарьном и И.А.Литвин. При помощи данной методики удастся выразить перемещения всех точек балки и основания через перемещения колесных пар. Это приводит к тому, что учет инерционных и упруго-вязких свойств подрельсового основания не изменяет структуру дифференциальных уравнений движения экипажа и отражается лишь на численных значениях коэффициентов этих уравнений.

Дифференциальные уравнения движения составлялись как уравнения Лагранжа второго рода. Диссипация энергии в системе "экипаж-путь" учитывалась согласно гипотезе Фойгта.

В матричной форме уравнения вынужденных колебаний сочлененного поезда имеют вид:

$$M\ddot{\bar{q}} + R\dot{\bar{q}} + C\bar{q} = \bar{Q}$$

где  $M$ ,  $R$  и  $C$  - соответственно матрицы инерционных, диссипативных и квазиупругих коэффициентов,  $\bar{q}$ ,  $\dot{\bar{q}}$ ,  $\ddot{\bar{q}}$  - векторы обобщенных координат, скоростей и ускорений,  $\bar{Q} = \bar{Q}(q, \dot{q}, \ddot{q})$  - вектор обобщенных сил, ненулевые элементы которого зависят от неровностей пути, их первой и второй производных. Математическая модель колебаний системы "сочлененный поезд-путь" построена для секции типа Д (см.таблицу) с произвольным числом вагонов. Выбор расчетной схемы этой секции в качестве исходный



позволяет весьма просто осуществить переход к другим расчетным схемам с одноступенчатым подвешиванием. Так, положив длину консоли равной нулю, получим схему Г; приняв равной нулю базу тележки - схему Б, а положив и длину консоли, и базу тележки равными нулю - схему А. Число степеней свободы для каждой расчетной схемы определяется простыми формулами, приведенными в таблице (  $n$  - количество пятников). Решение задачи о колебаниях сочлененных поездов проводилось с помощью ЭВМ "Минск-22М" численным интегрированием по методу Адамса-Башфорта.

Во второй главе приведены результаты исследования колебаний некоторых типов сочлененных поездов на тележках с одноступенчатым подвешиванием. Критериями оценки ходовых свойств экипажей служили динамические составляющие сил взаимодействия и усилий в рессорном подвешивании, динамические прогибы упругих элементов рессорного подвешивания, а также ускорения различных узлов экипажа. Диапазон изменения скоростей движения 20-100 м/сек. В качестве возмущений приняты вертикальные стыковые неровности косинусоидальной формы, симметрично расположенные на обеих рельсовых нитях:

$$\eta = \frac{d}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \epsilon_0 (\lambda - x) \quad \text{при } 0 \leq x \leq L,$$

где  $d$  - глубина неровности,  $\lambda$  - ее длина,  $L$  - расстояние между соседними неровностями,  $\epsilon_0$  - единичная функция Хевисайда.

Количество вагонов в сочлененном поезде обычно достаточно велико. Исследование колебаний всего поезда значительно упрощает решение задачи. Сравнение секций с различным числом вагонов (2-5) показало, что с увеличением числа вагонов динамические показатели меняются незначительно. Поэтому для исследования вертикальных колебаний сочлененных поездов нет необходимости включать в расчетную схему более двух вагонов.

Сочлененные поезда характеризуются многообразием схем опирания кузовов на тележки. При сопоставлении динамических показателей секций АЗ, БЗ и ВЗ оказалось, что на ходовые качества системы "сочлененный поезд-путь" мало влияет схема опирания кузовов на одноосные тележки.

Проведено сравнение сочлененного и автономного вагонов с одинаковой нагрузкой на ось колесной пары. В этом случае экипажи, состоящие из двухосных и одноосных вагонов, имеют лучшую плавность хода, чем одиночный двухосный вагон. Величины ускорений пятников крайних тележек сочлененного вагона в среднем на 20% ниже ускорений пятников двухосного вагона.

В конструкциях сочлененных поездов головные тележки могут существенно отличаться своими характеристиками от промежуточных. Изменение параметров средней тележки, даже в широких пределах, изменяет динамические показатели крайних тележек не более, чем на 5%.

На плавность хода экипажа и динамические составляющие усилий в подвешивании существенное влияние оказывают статический прогиб упругих элементов и коэффициент трения демпферов рессорного подвешивания. С увеличением статического прогиба от 0,1 до 0,25 м, при постоянном значении коэффициента трения демпферов, усилия в подвешивании и ускорения пятников уменьшаются. При дальнейшем росте прогиба эти показатели меняются незначительно. Увеличение коэффициента вязкого трения ( $\beta_d$ ) в демпферах рессорного подвешивания выше 0,1 его критической величины ( $\beta_{dкр}$ ) (при постоянном суммарном статическом прогибе) отрицательно влияет на ходовые свойства экипажей, но уменьшает длительность переходного режима. Для сочлененных поездов, состоящих из двухосных и одноосных вагонов, предлагается принимать этот коэффи-

циент равным  $(0,05 - 0,1) \beta_{\text{дкр}}$ , где  $\beta_{\text{дкр}} = 2\sqrt{k_i m_i}$ ,  $k_i$  — жесткость  $i$ -го рессорного комплекта,  $m_i$  — масса кузова, приходящаяся на  $i$ -й рессорный комплект.

В известных работах о вертикальных колебаниях сочлененных поездов рассматриваются чрезвычайно упрощенные расчетные схемы, не отражающие, в частности, свойств железнодорожного пути. Однако при современной постановке задачи о взаимодействии экипажа и пути необходимо, по нашему мнению, учитывать упругие, диссипативные и инерционные свойства основания. Справедливость этого тезиса подтверждается проведенным сопоставлением результатов решения задачи о вынужденных вертикальных колебаниях двухвагонной секции при различных моделях подрельсового основания (Власова-Леонтьева, Винклера и абсолютно жесткого пути). Оказалось, что выбор модели подрельсового основания при исследовании плоских колебаний сочлененных поездов существенно влияет на экстремальные значения сил взаимодействия при высоких скоростях движения. Так, при скорости 60 — 100 м/сек различие в величинах сил взаимодействия для случая модели основания Власова-Леонтьева и абсолютно жесткого пути достигает 75%.

При скоростях движения до 40 м/сек динамические добавки усилий в подвешивании и ускорения пятников практически не зависят от изменения параметров подрельсового основания.

Проведенный анализ влияния модуля упругости подрельсового основания на динамические составляющие сил и ускорения элементов системы показал, что с увеличением этого параметра свыше  $30 \text{ Мнм}^{-2}$  динамические характеристики стабилизируются. При меньших значениях модуля упругости его влияние на исследуемые величины существенно.

Коэффициент вязкого трения в материале подрельсового основания  $\beta_n$  варьировался в интервале  $(0,014 - 1) \beta_{\text{нкр}}$

Значительное влияние на динамические показатели оказывает этот параметр при его значениях меньших половины критической величины и скорости движения выше 40 м/сек.

С увеличением длины неровности рельсового пути динамические прогибы упругих элементов рессорного подвешивания увеличиваются, а силы взаимодействия уменьшаются. Эти результаты получены при исследовании движения двухвагонной секции по пути с косинусоидальными неровностями, длиной 3, 6, 12 и 25 м.

Динамические составляющие сил взаимодействия с ростом скорости движения монотонно нарастают. При постоянных характеристиках железнодорожного пути силы взаимодействия практически не зависят от параметров рессорного подвешивания, от способа опирания кузова на тележки и от количества вагонов в поезде. Определяющее влияние на силы взаимодействия оказывает величина неподрессоренных масс.

С целью повышения плавности хода экипажа при высоких скоростях движения и уменьшения сил взаимодействия, группой сотрудников ДИИТа и ДО ИМ АН УССР при участии автора предложена конструкция одноосной тележки для сочлененных вагонов, в которой неподрессоренным является только обод колеса. Конструкция защищена авторским свидетельством и может быть использована при проектировании сочлененных вагонов.

Третья глава диссертации посвящена исследованию колебаний сочлененных поездов на тележках с двухступенчатым подвешиванием. Такие поезда в настоящее время проходят испытания в Англии, Италии, Франции, Японии и, по мнению зарубежных специалистов, в недалеком будущем будут осуществлять основные пассажирские перевозки в этих странах.

Составлены дифференциальные уравнения колебаний двухвагонной секции с независимым опиранием кузовов на промежуточную

тележку (схема 32 таблицы). Поскольку в сочлененном поезде параметры головных и промежуточных тележек могут значительно отличаться, учитывался тот факт, что значения функции влияния прогибов пути, зависящие от базы тележки, различны для крайних и средних тележек.

Для проверки правильности построенной математической модели плоских колебаний системы "экипаж-путь" сопоставлены аналитические решения с результатами экспериментальных исследований СВД в 1972-1973 гг. Уравнения движения одиночного вагона с двухступенчатым подвешиванием несложно получить, используя методику, которая применялась при построении математической модели двухвагонной секции. Сопоставлялись силы взаимодействия, ускорения в подвешивании и ускорения буксовых узлов. Результаты аналитических и экспериментальных исследований достаточно хорошо совпадают, что свидетельствует о корректности математической модели и используемой методики расчета.

Проведено сравнение экипажей с одно- и двухступенчатым подвешиванием. При этом рассматривались колебания секций А2, Г2 и И2. Параметры экипажей выбирались таким образом, чтобы нагрузка на ось колесной пары была одинакова для всех расчетных схем. Неподдресоренная масса одноосной тележки принималась в два раза меньшей неподдресоренной массы двухосной тележки. Результаты расчета показали, что при одинаковом суммарном статическом прогибе упругих элементов и коэффициенте вязкого трения демпферов рессорного подвешивания лучшие динамические показатели у вагонов на тележках с двухступенчатым подвешиванием. Особенно заметно преимущество таких вагонов на высоких скоростях движения.

При исследовании колебаний различных экипажей с двухступенчатым рессорным подвешиванием сравнивались сочлененные вагоны и четырехосный пассажирский вагон. Расчетные параметры эки-

нашей выскрились близкими к параметрам вагонов поезда РТ-200. Оказалось, что динамические показатели пассажирского вагона и сочлененных вагонов с совместным опиранием кузовов на промежуточную тележку отличаются всего на 5-10%. В случае раздельного опирания кузовов на промежуточную тележку ускорения их значительно меньше ускорений одиночного пассажирского вагона. Следовательно, для высокоскоростного движения предпочтительнее (с точки зрения вертикальных колебаний) использовать сочлененные поезда с независимым опиранием соседних кузовов на промежуточные тележки.

Помимо исследования колебаний сочлененных поездов при движении по детерминированным стыковым неровностям пути рассмотрено воздействие на систему "экипаж-путь" случайных возмущений.

Проведен сравнительный анализ плавности хода сочлененных вагонов с одной и двумя ступенями подвешивания, а также одиночного и сочлененных вагонов на тележках с двухступенчатым подвешиванием. Возмущения на входах системы задавались в виде широкополосного белого шума. Для качественной оценки результатов решения (а именно такая задача ставилась при исследовании случайных колебаний) задание возмущений белым шумом оказывается вполне корректным. Уровень белого шума можно определить, воспользовавшись экспериментальными данными о вертикальных ускорениях буксовых узлов, полученными при испытании СВЛ.

Сравнение расчетных схем секций А2, Г2 и И2 показало, что почти на всех скоростях движения (в диапазоне 20-100 м/сек) лучшей плавностью хода обладают вагоны на тележках с двухступенчатым подвешиванием, а из сопоставления схем И1, И2 и З2 следует, что при движении с высокими скоростями ( $V > 50$  м/сек) несколько лучшая плавность хода у секции с независимым опиранием соседних кузовов на промежуточные тележки.

Таким образом, результаты, полученные при исследовании

колебаний сочлененных поездов на пути с детерминированными и случайными неровностями, качественно совпадают.

### Выводы

1. Сочлененные поезда, обладающие рядом преимуществ по сравнению с традиционными конструкциями подвижного состава железных дорог представляются весьма перспективными для высокоскоростного движения.
2. Разработана математическая модель для исследования вертикальных колебаний системы "сочлененный поезд-путь" при детерминированных и случайных неровностях пути. Аналитические решения в случае детерминированных и случайных возмущений качественно совпадают.
3. При исследовании плоских колебаний сочлененных поездов достаточно рассматривать двухвагонную секцию, а результаты, полученные для этой секции, можно распространять на весь поезд. Динамические показатели сочлененных вагонов на одноосных тележках практически не зависят от способа опирания кузова на колесные пары.
4. С увеличением статического прогиба упругих элементов от 0,1 до 0,25 м динамические добавки усилий в подвешивании и ускорения пятников уменьшаются. Для поездов, состоящих из двухосных и одноосных вагонов, рациональными с точки зрения гашения вертикальных колебаний являются значения коэффициентов вязкого трения демпферов в интервале 10-25  $\text{м сек}^{-1}$ .
5. При постоянных характеристиках инерционного основания, изменение параметров рессорного подвешивания, а также схемы сочленения и числа вагонов в поезде практически не влияет на величины динамических добавок сил взаимодействия.

6. Влияние параметров подрельсового основания на ходовые качества сочлененных поездов проявляется на скоростях движения выше 40 м/сек. При исследовании вертикальных колебаний высокоскоростных сочлененных поездов необходимо учитывать инерционные, упругие и диссипативные свойства основания.

При значениях модуля упругости основания меньших  $30 \text{ Мнм}^{-2}$  и коэффициента трения в основании меньше половины значения критической величины, влияние этих характеристик на динамические показатели системы "сочлененный поезд-путь" существенно.

7. В случае одинаковой нагрузки на ось колесной пары сочлененные поезда, состоящие из двухосных и одноосных вагонов, имеют несколько лучшую плавность хода, чем одиночный двухосный вагон.

Динамические показатели автономного пассажирского вагона и сочлененных вагонов, кузова которых совместно опираются на промежуточную тележку, отличаются мало.

8. С целью улучшения плавности хода на высоких скоростях движения в конструкциях сочлененных поездов целесообразно использовать одноосную тележку по авторскому свидетельству № 310832.
9. При одинаковом суммарном статическом прогибе упругих элементов вагоны на тележках с двухступенчатым подвешиванием имеют лучшую плавность хода по сравнению с вагонами на тележках с одноступенчатым подвешиванием.

Для высокоскоростного движения предпочтительнее (с точки зрения вертикальных колебаний) использовать сочлененные поезда с независимым опиранием соседних кузовов на промежуточные тележки.



Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. О плоских колебаниях сочлененного поезда, движущегося по инерционному пути. В кн. "Материалы 33 научно-технической конференции Брянского института транспортного машиностроения", Брянск, 1972.
2. Дифференциальные уравнения плоских колебаний сочлененного поезда, движущегося по инерционному пути. В сб.Труды ДИИТа, вып.143. Днепропетровск, 1973.
3. К вопросу об определении коэффициента эквивалентного вязкого трения в системе "экипаж-путь". В сб.Труды ДИИТа, вып. 152, 1974. (в соавторстве с А.И.Залесским и Е.Ю.Трубицкой).
4. Вынужденные колебания сочлененного поезда при его движении по инерционному пути. В сб.Труды ДИИТа, вып.152, 1974.
5. Некоторые задачи исследования вертикальных колебаний системы "экипаж-путь". В кн."Материалы симпозиума по моделированию динамики подвижного состава". Брянск, 1973 (в соавторстве с В.Д.Дановичем и др.).
6. Одноосная тележка для сочлененных экипажей. Авторское свидетельство № 310832, заявлено 28 мая 1970, опубликовано 9 августа 1971, Бюллетень № 24 (в соавторстве с В.А.Лазаряном и др.).

НТБ  
ДНУЖТ

**Материалы диссертации доложены:**

1. На конференции молодых ученых Днепропетровского отделения Института механики АН УССР, Днепропетровск, 1972.
2. На юбилейных научно-технических конференциях Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, Днепропетровск, 1972 и 1974 г.г.
3. На симпозиуме "Проблемы моделирования динамики подвижного состава", Брянск, 1973.
4. На совещании "Некоторые задачи механики скоростного наземного транспорта", Днепропетровск, 1974 г.
5. На семинаре по механике Днепропетровского отделения Института механики АН УССР и Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, Днепропетровск, 1974 г.

68/44  
БТ 26895. Подписано к печати II/X-1974г. Заказ № 1717.  
Тираж 150 экз. ДИИТ, ротационт. Днепропетровск, 10,  
ул. Университетская, 2.

Сканировала Юнаковская В. В.

