

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Трубицкая Елена Юрьевна

На правах рукописи

62.9.45.

КОЛЕБАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ
СКОРОСТНОГО ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА

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

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Днепропетровск, 1978

НТБ
ДНУЖТ

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Трубицкая Елена Юрьевна

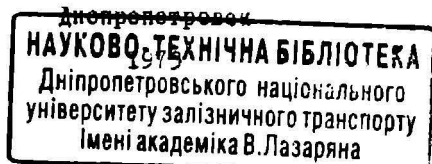
На правах рукописи

КОЛЕБАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЙ СКОРОСТНОГО
ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА

01.02.06 - Динамика, прочность и надежность машин,
приборов, аппаратурн.

6459a

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



НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском отделении Института механики АН УССР.

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки УССР, академик АН УССР, д.т.н., профессор
ЛАЗАРЯН В.А.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор
КУЦЕНКО С.М.,
кандидат физико-математических наук,
доцент ДЛУГАЧ Л.А.

Ведущая организация: Отделение комплексных испытаний и взаимодействия пути и подвижного состава Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта.

Автореферат разослан "21" декабря 1973 г.

Защита диссертации состоится "7" февраля 1974 г.
в 14 часов 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
доцент

ЛОГВИН А.Ф.

НТБ
ДНУЖТ

Организация высокоскоростного движения представляет собой одну из крупнейших научно-технических и экономических проблем развития железнодорожного транспорта. Для ее решения, кроме усовершенствования существующего подвижного состава, потребуются создание новых видов железнодорожных экипажей, удовлетворяющих требованиям прочности, безопасности движения, комфорта пассажиров.

При проектировании новых видов подвижного состава предварительная теоретическая оценка его динамических качеств приобретает первостепенное значение, так как для построения опытных образцов и подготовки пути требуется длительное время и большие капиталовложения.

Теоретические основы динамики подвижного состава и взаимодействия его с рельсами заложены в работах отечественных и зарубежных ученых: Н.Е.Жуковского, А.М.Годыцкого-Цвирку, М.В.Винокурова, В.А.Лазаряна, Б.В.Медея, М.Ф.Вериги, С.В.Вершинского, Н.А.Ковалева, С.М.Куценко, Т.А.Тибилова, И.И.Челнокова, Марье, Кейна, Мацудайры, де Патера, Роккара, Уиккенса и др.

Разносторонние исследования по динамике и прочности подвижного состава и пути, основанные на экспериментальных данных, проводятся коллективами научных сотрудников ЦНИИ МПС, ВНИИВагоностроения, МИИТа, ЛИИЖТа, ДИИТа, БИИТа и др.

В настоящее время разработаны способы предварительной оценки динамических качеств рельсовых экипажей уже на стадии их проектирования. Естественно, возникает вопрос о применимости методики таких оценок, созданной для нужд существующего подвижного состава, к расчетам высокоскоростных рельсовых экипажей.

Ответить на этот вопрос можно только после сопоставления результатов специально поставленного натурального эксперимента и аналитических расчетов. В 1972-1973 г.г. на Приднепровской ж.д. проведены испытания скоростного вагона-лаборатории (СВЛ). После подбора параметров подвешивания СВЛ получено значение

ДНУЖТ

критической скорости движения, достаточно точно совпадающей с результатами расчета. О величине сил, действующих на путь, можно судить по значениям напряжений и перемещений рельса. Также измерения проводились путепытательной лабораторией ДИИТа. Оказалось, что при изменении скорости движения от 160 до 250 км/час значительного нарастания напряжений в рельсе не наблюдается. Это свидетельствует о необходимости уточнения расчетной схемы пути при исследованиях колебаний высокоскоростных экипажей, в частности следует учитывать не только упруго-вязкие, но и инерционные свойства основания.

Чтобы обеспечить требуемую точность результатов необходимо пользоваться довольно сложной расчетной схемой, состоящей из двух основных частей - моделей экипажа и деформируемого инерционного пути.

Железнодорожный экипаж является системой связанных между собой твердых и деформируемых тел, путь - системой с распределенными параметрами, поэтому расчетную схему экипажа и пути следует выбирать в виде дискретно-континуальной системы. Для исследования совместных колебаний экипажа и пути записываются уравнения связей между соответствующими частями расчетной схемы.

В первом приближении связь между колесом и рельсом в вертикальной плоскости можно считать линейной, двухсторонней:

$$z_{\text{ц}} = z_{\text{ц}}^* + \rho_{\text{ц}},$$

где $z_{\text{ц}}$ и $z_{\text{ц}}^*$ вертикальные перемещения колеса и рельса в точке контакта $\rho_{\text{ц}}$ - ордината текущей неровности пути. Вертикальную силу взаимодействия колеса и рельса можно легко найти как реакцию этой связи

В горизонтальной плоскости между колесом и рельсом имеется так называемая «слабо неголономная связь». За неимением достаточной

НГБ
ДНУЖТ

простых уравнений этой связи, для определения горизонтальных сил взаимодействия вводятся некоторые допущения. Обычно для их определения в линейной теории пользуются гипотезой крипа, предложенной Картером. Система "экипаж-путь" находится под действием консервативных, диссипативных и собственно неконсервативных сил. В такой динамической системе при определенных условиях возможна потеря устойчивости.

Для скоростного транспорта пригодны только такие экипажи, движение которых устойчиво во всем диапазоне допускаемых скоростей. В то же время большинство современных вагонов обладает низкими критическими скоростями. С увеличением скорости движения таких вагонов горизонтальные силы, действующие на путь значительно нарастают, часто превосходя пределы допустимых.

В работах Лазаряна В.А., Коротенко М.Л., Львова А.А., Радченко Н.А. показано, что соответствующим выбором параметров можно добиться устойчивого движения вагонов в широком диапазоне скоростей. Из работ Уиккенса следует, что параметры, оптимальные с точки зрения устойчивости движения в прямых и удовлетворительного вписывания в кривых участках пути, не совпадают. При сравнительно низких скоростях движения и малых радиусах кривых это техническое противоречие решалось в пользу вписывания, что привело к созданию и длительному совершенствованию тележечных экипажей.

Увеличение скоростей движения предъявляет повышенные требования к плану пути, в частности, значительно уменьшаются минимально допустимые радиусы кривых. С другой стороны, вследствие превышения критических скоростей движения могут резко возрасти боковые усилия, действующие в прямых участках пути. Поэтому для скоростных экипажей доминирующими являются требования динамической устойчивости экипажа. В этом заключается причина того интереса, который в ряде стран вызывает исследования динамики нетележечных

НТБ
ДНУЖТ

вагонов. Предполагается, что этот тип экипажей имеет лучшие динамические характеристики в горизонтальной плоскости. Необходимость уменьшения необрессоренных масс скоростного подвижного состава также говорит в пользу нетележных экипажей.

В связи с этим проведено большое количество теоретических и экспериментальных исследований, посвященных оценке динамических качеств двухосных вагонов. В теоретических работах, однако, большинство авторов ограничивается очень простой расчетной схемой, сводя, по-существу, задачу об устойчивости движения вагона к задаче об устойчивости движения колесной пары при тех или иных допущениях. Между тем, влияние характера соединения колесных пар с кузовом представляется существенным и может качественно изменять динамические характеристики расчетной схемы.

Таким образом необходимо получить достоверные данные о динамической устойчивости двухосных вагонов и сравнить их с соответствующими характеристиками тележных экипажей. Сравнению подлежит также воздействие на путь, ускорение кузова и т.д. Поэтому исследования динамики двухосных вагонов представляют значительный интерес с точки зрения создания новых типов экипажей для скоростного транспорта.

Реферируемая работа посвящена исследованиям колебаний и устойчивости движения двухосного вагона, предназначенного для высоких скоростей движения (свыше 250 км/час). Вагон представляет собой экипаж, кузов которого через систему элементов рессорного подвешивания опирается на две одноосные тележки. Упруго-вязкое соединение кузова и тележек допускает линейные и угловые перемещения соединяемых тел по всем направлениям. Каждая тележка состоит из легкой рамы, в подшипниках которой укреплена ось колесной пары. Колеса вагона упругие, вследствие чего возможны радиальные и аксиальные перемещения бандажа относительно ступицы.

НТБ
ДНУЖТ

В отечественной и зарубежной патентной литературе встречается большое количество вариантов таких конструкций. Упругим элементом могут служить резиновые, резино-металлические прокладки, биметаллические гофрированные диски колес, пневмобаллоны и т.д. Днепропетровским трубопрокатным заводом выпущена опытная партия колес с гофрированными дисками. Как показали натурные испытания жесткость такого колеса в три раза меньше обычной и составляет 60000 тм^{-1} .

В первой главе настоящей работы составляются расчетные схемы для исследования динамики описанного экипажа и пути. Экипаж рассматривается как система $3^{\text{-X}}_7\text{-мн}$ твердых тел с упруго-вязкими связями. Относительно пути в основном варианте расчетной схемы приняты следующие допущения.

1. Путь может быть представлен двумя балками, лежащими на упругом основании Власова В.З. - Леонтьева Н.Н.
2. Нагрузка на основание от каждой рельсовой нити считается равномерно распределенной в пределах половины длины шпала.
3. Нагрузка на одну из рельсовых нитей не влияет на перемещение другой.
4. Вертикальные и горизонтальные перемещения рельса равны соответствующим перемещениям основания в точке контакта.
5. Перемещения основания за пределами шпала не принимаются во внимание.

Для принятой расчетной схемы пути составлены и решены уравнения совместных колебаний рельса и основания под действием движущейся нагрузки. Введение допущений п.п. 2-5 значительно упрощает уравнения пространственных колебаний рельса и основания, записанных Власовым В.З и Леонтьевым Н.Н. Они были введены после оценки величин коэффициентов связей и связности точных уравнений пространственных колебаний рельсо-шпальной

решетки, лежащей на власовском основании. В результате принятых допущений уравнения колебаний пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях оказываются несвязанными между собой.

Решением этих уравнений служат функции распределения вертикальных и горизонтальных перемещений по длине рельса:

$$F(x) = \exp(-\alpha x) \cdot \left(\frac{\alpha}{\beta} \sin \beta x + \cos \beta x \right).$$

Формы упругих линий рельса в вертикальной и горизонтальной плоскостях одинаковы и отличаются численными значениями параметров α и β , которые зависят от характеристик грунта, распределительной способности основания, скорости движения.

Дифференциальные уравнения движения экипажа и пути составлялись как уравнения Лагранжа II-го рода.

Для определения кинетической и потенциальной энергии пути применялась гипотеза Петрова-Шахунинца.

В матричной форме уравнения вынужденных колебаний системы "экипаж-путь" имеют вид:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = Q(\eta, \dot{\eta}, \ddot{\eta}),$$

- где q - n -мерный вектор обобщенных координат системы,
 n - число степеней свободы,
 A - матрица инерционных коэффициентов системы,
 B - суммарная матрица коэффициентов функции рассеивания энергии и диссипативной составляющей сил крипа,
 C - сумма матриц квазиупругих коэффициентов и псевдогироскопической составляющей сил крипа,
 Q - возмущения со стороны пути.

Для оценки влияния характеристик пути и жесткостей колес на колебания и устойчивость движения вагона составлено пять вариантов расчетной схемы соответственно с 3I, 25, 23, 17, 12 степенями свободы.

Во второй главе исследуется устойчивость невозмущенного движения по I приближению Ляпунова. Для всех вариантов расчетной схемы приемом одвига шпраней определены такие параметры вагона, при которых его движение устойчиво.

За критерий качества системы с точки зрения устойчивости движения принималась величина E_1 (запас устойчивости системы) определяемая соотношением:

$$E_1 = -\max \operatorname{Re} \lambda_k,$$

где $\lambda_k = \operatorname{Re} \lambda_k + i \operatorname{Im} \lambda_k$ - собственные числа дифференциальных уравнений первого приближения Ляпунова. Рациональными с точки зрения устойчивости движения вагона считались такие его параметры, при которых это движение устойчиво во всем диапазоне допускаемых скоростей и запас устойчивости (для всех вариантов расчетной схемы) мало зависит от небольших ($\pm 10\%$) изменений этих параметров.

Для исследуемого вагона найдены рациональные параметры, оценено влияние величин жесткостей подвешивания, коэффициентов демпфирования, некоторых геометрических характеристик вагона, а также модуля упругости основания на устойчивость движения вагона.

Наибольшее влияние на устойчивость движения вагона оказывают величины горизонтальной продольной и поперечной жесткостей рессорного подвешивания и коэффициентов поглощения энергии демпферов, установленных параллельно упругим элементам подвешивания.

НГВ
ДНУЖТ

Проведено сравнение устойчивости движения исследуемого вагона с подобным четырехосным (одноосные тележки исследуемого вагона заменены двухосными).

В главе III исследуются вынужденные колебания вагона и пути. В качестве возмущений приняты вертикальные стыковые неровности косинусоидальной формы, симметрично расположенные на обеих рельсовых нитях, вида:

$$\eta = \frac{d}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{\lambda}\right) \sigma_0 (\lambda - x) \quad \text{при } 0 \leq x \leq L,$$

где d - глубина неровности, λ - длина ее, L - расстояние между соседними неровностями.

Параметры расчетной схемы выбраны из области значений, соответствующей устойчивому движению вагона. При этом условии симметричное возмущение в вертикальном направлении вызывает колебания вагона в вертикальной плоскости его симметрии.

На ЭЦВМ "Минск-22М" численным интегрированием дифференциальных уравнений (методом Рунге-Кутты четвертого порядка) были получены зависимости от времени обобщенных координат и сил при различных параметрах вагона и пути. Скорости движения вагона варьировались от 20 до 100 м/сек. Анализ динамических добавок сил взаимодействия показал, что последние нарастают с увеличением скорости движения. При радиальной жесткости колес $k_j > 100000 \text{ тм}^{-1}$ и амплитудах неровности (d) свыше 4 мм динамические добавки сил взаимодействия в рассматриваемом диапазоне скоростей превышают статическую нагрузку на рельс. Поэтому в расчетную схему экипажа и пути была введена неударивающая связь между колесом и рельсом:

$$z_{ij} \leq z_{ij} + \eta_{ij}.$$

НТБ
ДНУЖТ

Дифференциальные уравнения колебаний экипажа и пути при совместном и раздельном движении колеса и рельса отличаются между собой. Для составления соответствующих уравнений вводилось два дополнительных допущения.

1. После отрыва колеса рельс совершает затухающие колебания в вертикальной плоскости. Предполагается, что форма упругой линии рельса остается такой же как при статическом нагружении его силой, приложенной в точке отрыва.
2. Удар, происходящий при восстановлении контакта предполагается абсолютно неупругим.

В результате решения нелинейных уравнений колебаний системы "экипаж-путь" получены осциллограммы перемещений твердых тел, сил в связях, а также сил, действующих на контакте колеса и рельса.

Раздельному движению колеса и рельса соответствуют нулевые силы взаимодействия. При восстановлении контакта они мгновенно нарастают. Одновременно нарастают силы, действующие на раму тележки. Величины последних мало отличаются от сил взаимодействия из-за большой жесткости колеса и малого коэффициента поглощения энергии в его материале.

На кузов удар практически не передается. Динамические добавки сил, действующих на кузов, не превышают 15% от их статической величины. В то же время ударное воздействие на путь достигает значительных величин уже при скорости 60 м/сек, если неровность имеет большую глубину. В работе приводятся зависимости максимальных сил взаимодействия от глубины неровности пути и радиальной жесткости колеса.

После анализа полученных результатов были сделаны следующие выводы.

1. При одинаковых системах рессорного подвешивания и одинаковой нагрузке на ось движение двухосного вагона более устойчиво, чем четырехосного. Кроме того, запас устойчивости исследуемого вагона значительно больше, чем существующих железнодорожных экипажей, что получается вследствие изменений в конструкции рессорного подвешивания.

2. Наибольшее влияние на устойчивость движения двухосного вагона оказывает величина горизонтальной жесткости рессорного подвешивания. При этом для обеспечения устойчивого движения исследуемого вагона при больших скоростях значения горизонтальной продольной (κ_{22}) и поперечной (κ_{21}) жесткостей рессорного подвешивания должны выбираться из области:

$$\left. \begin{array}{l} 500 \leq \kappa_{22} \leq 3000 \text{ ТМ}^{-1} \\ 300 \leq \kappa_{21} \leq 3000 \text{ ТМ}^{-1} \end{array} \right\} .$$

3. Запас устойчивости движения исследуемого вагона практически не меняется при малых (+10%) изменениях таких параметров, как величина необрессоренных масс, высота центра тяжести, длина базы вагона и т.д.

4. На устойчивость движения вагона существенно влияет конечность поверхностей катания колес. Однако, эта величина не постоянна в процессе эксплуатации и, следовательно, при расчете нужно принимать усредненные значения.

5. Жесткость упругих колес и параметры пути при указанных в п.2 значениях горизонтальных жесткостей рессорного подвешивания на запас устойчивости движения вагона влияют незначительно. Если параметры подвешивания выбраны таким образом, что движение вагона близко к границе устойчивости, то меньшим значениям жесткости колес соответствует меньший запас устойчивости движения.

6. При решении задачи взаимодействия экипажа и пути рассматривалось три варианта модели основания:

- а) абсолютно жесткий путь,
- б) основание Винклера,
- в) основание Власова.

Экстремальные значения сил для всех трех моделей основания близки только при скоростях меньших, чем 60 м/сек. Если $V \geq 60$ м/сек, имеются существенные отличия между результатами, получаемыми при помощи различных моделей основания. Характер осциллограмм для абсолютно жесткого и упругого пути не совпадает как при низких, так и высоких скоростях. Таким образом при решении задачи взаимодействия скоростного экипажа и пути следует учитывать не только упруго-вязкие, но и инерционные свойства основания.

7. При движении экипажа по изолированной стыковой неровности косинусоидальной формы, глубиной не более 10 мм и длиной 3 м динамические добавки сил в рессорном подвешивании исследуемого вагона не превышали 15% их статической величины. Ускорения кузова во всем диапазоне рассматриваемых скоростей были не более $0,08 g$.

8. Силы взаимодействия колес и рельсов с увеличением скорости движения нарастают. Темп нарастания уменьшается после скоростей, превышающих 50 м/сек.

9. Введение упругих элементов между ступицей и ободом колеса уменьшает силы взаимодействия, если жесткость этих элементов не более 6000 тм^{-1} . В противном случае колесо можно считать абсолютно жестким. Исходя из этого, можно сделать заключение о том, что упругие колеса с гофрированными дисками, жесткость которых составляет 60000 тм^{-1} , не дают ожидаемого уменьшения динамического воздействия на путь.

Для колес с упруго-вязким соединением между ступицей и ободом

НИИ
ДМУЖТ

радиальная жесткость упругого элемента должна находиться в пределах $1500 - 5000 \text{ тм}^{-1}$.

Нижний предел диктуется соображениями устойчивости движения, верхний - величинами сил взаимодействия. При этом коэффициент поглощения энергии демферами вязкого трения должен быть $0,50-0,8$.

10. Изменение модуля упругости основания в пределах $1000,0-6000 \text{ тм}^{-2}$ не оказывает заметного влияния на величины сил в ресорном подвешивании. Силы взаимодействия увеличиваются, если модуль упругости больше 3000 тм^{-2} и скорость движения выше 40 м/сек .

11. При движении скоростного вагона по пути, имеющему геометрические неровности, возможен отрыв колеса от рельса.

12. В том случае, когда целью исследований является оценка плавности хода экипажа или анализ величин сил, действующих на кузов, можно пользоваться линейной моделью, считая связь между колесом и рельсом двухсторонней.

13. Для правильной оценки динамического воздействия экипажа на путь в расчетной схеме должно учитываться то обстоятельство, что связь между колесом и рельсом является неударивающей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах :

1. В.А.Лазарян, М.Л.Коротенко, Е.М.Трубицкая. Исследование устойчивости движения высокоскоростного экипажа с дополнительными упругими элементами в системе подвешивания. Материалы юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1970. (Ръ. Железнодорожный транспорт, в 10, 1970).
2. М.Л.Коротенко, Е.М.Трубицкая. Об устойчивости движения двухосного вагона. Труды ДИИТа, вып. 128, Днепропетровск, 1972.
3. В.Д.Данович, Е.М.Трубицкая. Дифференциальные уравнения пространственных колебаний железнодорожного экипажа, движущегося по инерционному пути. Сборник "Некоторые задачи механики скоростного транспорта". "Наукова думка", Киев, 1973.
4. В.Д.Данович, Е.М.Трубицкая. Математическая модель рельсового экипажа, движущегося по инерционному пути, для исследования пространственных колебаний. Материалы 33 научно-технической конференции БИТМа, Брянск, 1972.
5. Е.М.Трубицкая. Влияние параметров вагона на величину сил взаимодействия колес и рельсов при движении по изолированной неровности пути. Труды ДИИТа, вып.143, Днепропетровск, 1973.

Содержание работы доложено :

1. На юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1970.
2. На семинаре "Новые задачи устойчивости движения" Института механики АН УССР, Киев, 1971.
3. На 33 научно-технической конференции Брянского института транспортного машиностроения, Брянск, 1972.
4. На совещании "Некоторые задачи механики скоростного рельсового транспорта", Днепропетровск, 1972.

НТБ
ДНУЖТ

5. На сетевой научно-технической конференции "Динамика и меры повышения эксплуатационной надежности локомотивов в условиях железных дорог Урала и Сибири", Омск, 1972.
6. На симпозиуме "Проблемы моделирования динамики подвижного состава", Брянск, 1973.
7. На семинаре по механике Днепропетровского отделения Института механики и Днепропетровского института инженеров транспорта. Днепропетровск, 1973.

Сканировала Камьянская Н.А.

БТ-43096. Подписано к печати 26/ХІ-73г. І печ.л.Зак.І7І тир.150

ПОМ треста "Днепрогеофизика".ул.В.Дубинина,8.

УПР
ДНУЖТ