

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье рассмотрены тенденции развития динамики вагонов. Описаны основные научные школы этой дисциплины. Проведен обзор программных комплексов, применяемых для решения задач динамики. Описаны подходы к осуществлению компьютерного моделирования.

Ключевые слова: динамика вагонов, математическое моделирование, компьютерное моделирование, программные комплексы



И.К. Сергеев



С.В. Беспалько

Предметом исследования динамики вагона являются физические процессы, возникающие при взаимодействии ходовых частей подвижного состава с рельсами. От характера динамических процессов, сил и перемещений, возникающих по их причине, зависят безопасность движения поездов, расходы на эксплуатационные нужды отрасли и многие другие показатели эффективности перевозочного процесса. В связи с этим, решение таких задач динамики, как оценка изменений, вносимых в конструкцию изделий, а также создание и оптимизация новых конструктивных решений, остается актуальным на протяжении всего времени функционирования железных дорог.

Корректное построение математической динамической модели основывается на четком представлении процесса и анализе сил и взаимодействий, возникающих при движении подвижного состава.

С момента создания первых железных дорог инженеры начали свои исследования в области динамики, а самостоятельность науки приобрела к началу XX века. К этому времени относятся самые первые значительные работы российских и зарубежных ученых А.М. Годыцкого-Цвирко [10], Г. Марье [15], Х. Хеймана [24] и др. В этих работах исследовались особенности взаимодействия подвижного состава и пути, были разработаны методики определений напряжений и сил, возникающих в процессе взаимодействия.

Классификация колебаний, внесшая существенный вклад в аналитический метод определения частот свободных колебаний подвижного состава, была создана Н.Е. Жуковским. Так же его работы содержат методики определения и учета влияния на безопасность движения поездов сил трения, возникающих в зонах контакта колес и рельсов [11].

Сергеев Иван Константинович, ассистент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика и прочность подвижного состава. Автор девяти научных работ.

Беспалько Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика и прочность подвижного состава. Автор 60 научных работ.

Изучению зоны упругого скольжения в системе взаимодействия «колесо-рельс» посвящены работы Ф. Картера, который известен тем, что впервые обратил внимание научного сообщества на явление, названное им крипом [28].

В трудах Г. Марье были исследованы физические процессы, влияющие на плавность хода, и проведена оценка уровней ускорений элементов вагонов и локомотивов. Существенным выводом Г. Марье была идея о необходимости увеличения статического прогиба ходовых частей с целью повышения плавности хода. Марье впервые включил в математические модели упругие элементы.

Дальнейший вклад в стремительно развивавшуюся науку внесли М.В. Винокуров [9], А. Патер [29], М.Ф. Вериго [7], В.Б. Медель [16] и прочие известные деятели науки той эпохи.

Учитывать силу ветра при динамических расчетах, а также корректировать модели с учетом эксцентриситета колесной пары было впервые предложено Г.М. Шахунянцом [27]. Им было отмечено влияние на динамические процессы сил, передаваемых через сцепку, разработаны расчетные схемы с учетом зазоров в скользунах тележек и колебаний центра тяжести перевозимого груза.

Совершенствование конструкций подвижного состава привело к необходимости изучения вопросов безопасности движения поездов при отличающихся от нормативных геометрических параметрах деталей и узлов вагонов. Работы исследователей под руководством С.В. Вершинского и Л.А. Шадура, содержат математические модели вагонов на тележках с числом осей более двух и методы расчета целого класса применяемых в вагоностроении упругих элементов [8].

Представителями этой группы ученых являются такие деятели науки как Е.П. Корольков [13], Г.И. Петров [20], В.Н. Филиппов [23] и др.

В работах П.С. Анисимова изложена методика непосредственной оценки сил трения в узлах гасителей колебаний тележки, получены зависимости сил трения от динамических воздействий при различных перемещениях фрикционного клина, подчеркнута важность учета изменения модуля силы трения при решении исследовательских задач [1]. Позднее, П.С. Анисимовым в совместной работе с В.Д. Хусидовым был описан алгоритм, позволявший с высокой точностью вычислять силы сухого трения. Указанный алгоритм применялся во многих математических моделях.

Большую роль в развитии методологии расчета динамики подвижного состава играют труды ученых АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»). К примеру,

вопросам взаимодействия пути и подвижного состава посвящены труды М.Ф. Вериго [7].

В Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС) так же, как и в представленных выше организациях, была сформирована научная школа под руководством И.И. Челнокова. В работах И.И. Челнокова отмечена нелинейность рабочей характеристики фрикционных клиньев и получены обобщенные выражения для расчета сил трения с учетом направления перемещения узлов. Описано влияние химического состава, формы поверхности клина и планки на коэффициент трения этой пары [26]. Подробное изучение элементов вагонной тележки 18–100, включая пару трения «фрикционный клин–планка» было проведено в работе В.А. Кошелева [14]. Были освещены недостатки применяющихся демпферов вместе с возможными путями их устранения. Подробная модель тележки, учитывающая специфику работы гасителей колебаний, была предложена Ю.К. Мустафаевым и Л.В. Кудюровым [18]. В их работе отражена специфика движения вагона с гасителем колебаний, имеющим неисправность. Влияние конструкции рессорного подвешивания на энергетические затраты исследовалось в работе А.Н. Комаровой и Ю.П. Бороненко [12].

Следует отметить, что вопросы по изучению фрикционных клиньев обладают самой высокой степенью научной разработанности среди прочих объектов исследования вагонов с фрикционной связью. Вопросы механики элементов подпятниковой зоны, силы трения, действующей на шкворень изучены недостаточно подробно. К числу немногочисленных работ, посвященных этим вопросам, относится работа С.В. Павлова [19].

Для оценки исследований и моделей, получаемых учеными в процессе изучения динамики подвижного состава, применялся метод натуральных испытаний, однако негативным фактором применения данного метода для подтверждения качества разрабатываемых методик является дороговизна натуральных испытаний и их продолжительные сроки.

С развитием средств вычислительной техники широкое распространение получил метод компьютерного моделирования, позволяющий автоматизировать расчеты, быстро оценивать результаты исследований и моделировать различные динамические процессы, изменяя входные параметры процессов.

Очевидно, что для компьютерного моделирования необходимым условием является наличие адекватной математической модели, которая создается на начальном этапе исследования и включает в себя зависимости, необходимые для качественной программной реализации.

После составления математической модели наступает этап ее алгоритмизации. На этом этапе исследователю приходится учитывать особенности той среды, где он намерен создавать компьютерную модель. Тут возможны следующие варианты:

1) использование пакета программ, рассчитанных на решение задач конкретной научной области;

2) использование среды программирования и осуществление программной реализации исследуемого явления.

В настоящее время все более широкую популярность приобретает первый вариант компьютерного моделирования. Такие программные комплексы как UM (Универсальный механизм), «Дионис», ADAMS и другие позволяют решать широкий спектр задач динамики. Помимо этого, такие программные комплексы являются оптимизированными в вопросах экономии вычислительной мощности при расчетах.

ADAMS является одним из первых программных комплексов для решения задач динамики систем твердых тел. Самое первое руководство пользователя этого программного комплекса было издано еще в 1987 году. Вскоре программный комплекс получил пакет модулей, касающихся исключительно железнодорожной динамики. Это дополнение было разработано при содействии железных дорог Нидерландов и было названо ADAMS/Rail. Данная модификация комплекса предлагает исследователю широкий набор методов моделирования в зависимости от целей исследования, а также позволяет вносить изменения в собственный код, что рассчитано на опытных пользователей, владеющих программированием, и позволяет уточнять математические модели на этапе алгоритмизации. Последняя модификация комплекса известна под названием VI-Rail.

Комплекс A'GEM был создан в Канаде, в университете г. Кингстон. Этот комплекс отличается детализированным графическим интерфейсом и позволяет представлять результаты с использованием широкого спектра средств анимации.

Германским авиационным и космическим агентством в девяностых годах XX века был разработан комплекс моделирования динамики систем твердых тел. Особенности программного комплекса является наличие подвижной и неподвижной систем координат, а также возможность использовать нелинейные и квазилинейные модели сил в точке контакта колес с рельсами при моделировании. С помощью этого программного комплекса успешно решалось множество задач железнодорожной динамики в том числе и в нашей стране. Так, с помощью программного комплекса Medupa были определены динамические пока-

затели отечественного скоростного поезда «Сокол». Руководил работами Ю.П. Бороненко [6].

К числу прочих программных комплексов для моделирования динамики систем твердых тел относится Nucras, который позволяет создавать сложные модели механических систем и точно определять их механические параметры. Комплекс показывает хорошие результаты при определении коэффициента устойчивости от вкатывания колеса на головку рельса.

Разработчики компании «Британские железные дороги» в девяностых годах XX века создали свой программный комплекс, который носит название Vampire. Этот комплекс очень популярен во всем мире, однако имеет существенный недостаток — отсутствие возможности учета влияния клиновых гасителей колебаний, а поскольку именно такие гасители применяются в трехэлементных тележках на железных дорогах России, то Vampire не позволяет создавать модели отечественных грузовых тележек. Несмотря на это, комплекс не уступает в точности своим конкурентам.

Особенностью программного комплекса Omnisim является возможность построения динамических моделей деформируемых тел. Комплекс был успешно применен в 2002 году железнодорожной администрацией США для формирования годового отчета по безопасности движения поездов [30].

Одним из наиболее популярных отечественных программных комплексов является «Универсальный механизм». Этот комплекс был создан в восьмидесятых годах XX века в Брянском государственном техническом университете. Руководителем работ по созданию этого продукта является профессор Д.Ю. Погорелов [21]. Главной идеей разработки комплекса являлось создание инструмента для анализа механических систем. Однако вскоре комплекс получил расширение, в состав которого входил пакет, специально созданный для разработки моделей динамики железнодорожного транспорта. В этот пакет входили инструменты моделирования неровностей железнодорожного пути, различные профили колес и рельсов и др. Кроме того, комплекс позволяет решать системы уравнений без применения их линеаризации, что способствует высокой точности вычислений. Рельс является безынерционным элементом и определение положения рельса относительно колеса опирается на решение систем нелинейных уравнений равновесия. Разработаны теории контакта колес с рельсами и имеется возможность применять модели одноточечного контакта, двухточечного контакта, гребневого контакта, отрыва гребня и режима вкатки колес на рельсы. «Универсальный механизм» успешно применяется отечественными учеными для исследования

задач динамики [22]. Михальченко Г.С. использовал пакет программ «Универсальный механизм» в работе по определению параметров пространственных колебаний подвижного состава [17]. Гарантом адекватности полученных выходных данных является факт прохождения манчестерских тестов этим программным продуктом.

Разработкой программного комплекса «Дионис» занимались исследователи кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» МИИТа под руководством Г.И. Петрова. Данное программное обеспечение нуждается в доработке, поскольку не позволяет автоматически осуществлять синтез уравнений движения.

К основным направлениям развития существующих комплексов относится повышение точности расчетов, кроме того, рост вычислительных мощностей позволяет перейти к решению задач моделирования движения вагонов и локомотивов в составе поезда.

Второй путь алгоритмизации расчетной модели заключается в использовании разработчиком среды программирования и осуществлении программной реализации исследуемого явления. Такой подход, хоть и является более затратным по времени, но позволяет применять узкоспециализированные методики для конкретизации получаемых результатов. Кроме того, он имеет более широкие возможности визуализации данных (при условии наличия соответствующих навыков у создателя программы).

Популярной средой разработки программного обеспечения является среда Borland C++ Builder. Эта среда позволяет осуществлять построение компьютерной модели на всех этапах ее разработки. Благодаря широким возможностям визуализации и осуществлению программирования путем создания отдельных компонентов — «объектов», программы в среде Borland C++ Builder получают лаконичными, обладая в то же время всеми необходимыми возможностями. Это положительное свойство вносит вклад в удобство использования программ и упрощает этап

оптимизации уже созданных продуктов. Кроме того, среда Borland C++ Builder постоянно развивается и на рынок поступают новые версии, предоставляющие широкие возможности моделирования любых физических процессов.

Примером использования среды может служить работа В.И. Богачева, который программными средствами Borland C++ Builder реализовал математическую модель колебаний жидкости в котле цистерны [3].

Для разработки собственных программных продуктов исследователь должен обладать знаниями и навыками в программировании. Такой подход хоть и требует дополнительных навыков и временных затрат на написание и отладку программы, но в то же время позволяет осуществлять контроль этапов расчета на всех стадиях проектирования.

В заключение необходимо отметить, что динамика вагонов является одной из важных железнодорожных наук, которая имеет прямое отношение к безопасности движения поездов и постоянно развивается. Развитие компьютерных технологий позволило проводить численные эксперименты при помощи аппарата математического моделирования. С помощью программных комплексов исследователь, обладающий навыками математического моделирования и познаниями в области динамики способен создавать компьютерные модели, не углубляясь в вопросы прикладного программирования. Однако такой подход не лишен недостатков, одними из которых являются отсутствие «гибкости» комплекса при моделировании и отсутствие возможности контроля процесса вычислений, поскольку программный комплекс является не чем иным, как «черным ящиком» для исследователя. Использование сред разработки программного обеспечения является дополнительным методом компьютерного моделирования, позволяющим получать результаты вычислений с учетом конкретных особенностей исследуемых процессов и моделей. 

Литература

1. Анисимов, П.С. Гасящий потенциал фрикционного клина / П.С. Анисимов // Мир транспорта. — 2010. — Т. 8, № 1 (29). — С. 32–39.
2. Беспалько, С.В. Разработка и анализ моделей повреждающих воздействий на котлы цистерн для перевозки криогенных продуктов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Сергей Валерьевич Беспалько; МИИТ. — М., 2000. — 427 с.
3. Беспалько, С.В. Исследование колебаний жидкости в котле цистерны с применением тригонометрических рядов / С.В. Беспалько, В.И. Богачев // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты. VII международная научно-техническая конференция: тезисы докладов. — СПб., 2011. — С. 29–32.

4. Блохин, Е.П. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Е.П. Блохин, Л.А. Манашкин, Е.Л. Стамблер и др.; Под ред. Е.П. Блохина. — М.: Транспорт, 1986. — 265 с.
5. Богомаз, Г.И. Нагруженность вагонов-цистерн при переходных режимах движения поездов: монография / Г.И. Богомаз, Н.Е. Науменко, А.Н. Пшинько, С.В. Мямлин. — К.: Наукова думка, 2010. — 216 с.
6. Бороненко, Ю.П. Опыт проектирования трехэлементных тележек [Текст] / Ю.П. Бороненко, А.М. Орлова // Железнодорожный транспорт. — 2006. — №5. — С. 58–62.
7. Вериго, М.Ф. Вертикальные силы, действующие на путь при прохождении подвижного состава / М.Ф. Вериго // Тр. ВНИИЖТ. — 1955. — Вып. 19. — С. 25–288.
8. Вершинский, С.В. Динамика вагона: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, В.Д. Хусидов; Под ред. С.В. Вершинского. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1991. — 360 с.
9. Винокуров, М.В. Исследование колебаний и устойчивости вагонов / М.В. Винокуров // Тр. ДИИТ. — 1940. — Вып. 12. — С. 3–292.
10. Годыцкий—Цвирко, А.М. Взаимодействие пути и подвижного состава железных дорог / А.М. Годыцкий—Цвирко. — М.: Гострансиздат, 1931. — 214 с.
11. Жуковский, Н.Е. Полное собрание сочинений / Н.Е. Жуковский. Т.7. Колебания паровоза на рессорах. — М.: Мир, 1975. — 541 с.
12. Комарова, А.Н. Сравнительная оценка сопротивления движению грузовых вагонов на тележках различных типов / А.Н. Комарова, Ю.П. Бороненко // Транспорт Российской Федерации. — 2014. — №3 (52). — С. 69–72.
13. Корольков, Е.П. Снижение износа колес железнодорожного подвижного состава при конструктивных изменениях ходовых частей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Е.П. Корольков; Моск. ун-т путей сообщения. — Москва, 1997. — 48 с.
14. Кошелев, В.А. Грузовой вагон: связи, скорость и свойство устойчивости невозмущенного движения / В.А. Кошелев // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2006. — №4 (9). — С. 71–82.
15. Марье, Жорж. Взаимодействие пути и подвижного состава / Г. Марье; Пер. с фр. К.К. Дмоховского, А.Н. Шумилова; Под ред. Н.А. Бредихана, Н.Т. Митюшина, Ф.В. Пугачевского. — Москва; Ленинград: Госжелдориздат, 1933. — 338 с.
16. Медель, В.Б. Динамика электровоза: Допущено Центр. упр. учеб. заведениями НКПС в качестве учеб. пособия для электротяговых втузов / В.Б. Медель. — Москва: изд. и 5 тип. Трансжелдориздата, 1937. — 415 с.,
17. Михальченко, Г.С. Исследование пространственных колебаний рельсовых экипажей с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» / Г.С. Михальченко, Д.Ю. Погорелов, В.А. Симонов, А.В. Круговых, В.В. Симонов. Тез. докл. IX Междунар. конф. — ДГТУ, 1996. — С. 107–108.
18. Мустафаев, Ю.К. Динамика тележки грузового вагона с учётом параметров демпфера сухого трения / Ю.К. Мустафаев, Л.В. Кудюров // Известия Самарского научного центра РАН. — 2011. — Т.13, №4 — 3s. — С. 226–228.
19. Павлов, С.В. Оценка динамической нагруженности шкворневых узлов вагонов-цистерн и совершенствование их конструкции: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Сергей Васильевич Павлов; Ин-т инж. ж.-д. транспорта. — Санкт-Петербург, 1993. — 74 с.
20. Петров, Г.И. Построение уточненной компьютерной модели грузового вагона / Г.И. Петров, С.И. Порядин, С.В. Калетин, О.И. Паначев, М.В. Сапетов, А.О. Иванов // МИИТ. — 2013. — XIV научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». — С. 7–35.
21. Погорелов, Д.Ю. Компьютерное моделирование динамики рельсовых экипажей / Д.Ю. Погорелов // Сб. докл. междунар. конгресса «Механика и трибология транспортных систем — 2003»: В 2 т. — Ростов-на-Дону, 2003. — Т. 2. — С. 226–232.
22. Погорелов, Д.Ю. Моделирование контактных взаимодействий в задачах динамики систем тел / Д.Ю. Погорелов, А.Э. Павлюков, Т.А. Юдакова, С.В. Котов // Динамика, прочность и надежность транспортных машин: Сб. науч. тр.; Под ред. В.И. Сакало. — Брянск: БГТУ, 2001. — С. 11–23.
23. Филиппов, В.Н. Исследование поведения вагонов при аварийном соударении: (Анализ аварийных ситуаций с цистернами) / В.Н. Филиппов, Е.А. Радзиховский // Вестник ВНИИЖТ. — 1994. — №3. — С. 9–12.
24. Хейман, Х. Направление железнодорожных экипажей рельсовой колеи / Х. Хейман // Трансжелдориздат. — 1957. — 416 с.

25. Хусидов, В.Д. Методика компьютерной оценки безопасности движения подвижного состава / В.Д. Хусидов, Ю.С. Ромен, Г.И. Петров [и др.] // МПС. – 1999. – С. 105.
26. Челноков, И.И. Гасители колебаний вагонов / И.И. Челноков, Б.И. Вишняков, В.М. Гарбузов, А.А. Эстлинг. – Москва: Трансжелдориздат, 1963. – 177 с.
27. Шахуняц, Г.М. Железнодорожный путь: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Г.М. Шахуняц. – Москва: Трансжелдориздат, 1961. – 615 с.
28. Carter F.W. On the action of locomotive driving wheel // Proc. Roy. Soc. A. – 1928. – Vol. 121. – P. 151–157.
29. Pater A.D. de. The approximate determination of the hunting movement of a railway vehicle by aid of the method of Krylov and Bogolubov // App. Sci. Res. Sec. A. – 1961. – Vol. 10. – P. 205–228.
30. Safety of Railroad Passenger Vehicle Dynamics. Final Summary Report. U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 2002, 53 с.