

чаются повышенной сопротивляемостью ударным нагрузкам, меньшим абразивным износом и большей термостойкостью.

Sherwin-Williams разработала также эпоксидное покрытие на водной основе, которое соответствует нормам Агентства по защите окружающей среды США (EPA) в отношении содержания летучих органических веществ (VOC), загрязняющих атмосферу.

Соответствующее оборудование для составления составов и их нанесения является ключевым моментом эффективности и экономичности применения покрытий. Компания **Graco** выпускает оборудование с числовым программным управлением для смешивания и нанесения материала покрытий методом распыления, что позволяет владельцам подвижного состава решить многие проблемы и снизить затраты, связанные с защитой вагонов.

Установка Graco Xtreme Mix готовит смесь в соответствии с заданным соотношением составляющих материала покрытия. Исключение ошибок, которые могут быть при распылении неотверждаемого или смешанного в неправильных пропорциях состава, позволяет экономить время и средства, снижает потери материала и трудоемкость нанесения покрытия.

Решение о выборе определенного типа покрытия принимает владелец подвижного состава, руководствуясь желанием защитить инвестиции или максимально эффективно использовать вагоны. Однако не следует забывать, что защитное полиуретановое покрытие не только продлит срок службы вагона, например, для перевозки угля, но и обеспечит его современный и приятный внешний вид.

*Ch. Yuarte. Railway Age, 2003, № 5, p. 32 – 33.*

УДК 625.1.032.3.001.57

## Моделирование системы колесо — рельс

*С момента возникновения железных дорог проблеме взаимодействия подвижного состава и пути и в частности колеса и рельса уделялось особое внимание, поскольку от характера этого взаимодействия и сопутствующих ему явлений во многом зависели как технико-эксплуатационные показатели деятельности железнодорожного транспорта, так и безопасность движения поездов. В последнее время в исследовании проблемы широко применяется компьютерное моделирование с использованием соответствующего программного обеспечения. Ниже приведен обзор работ, выполненных по данной тематике специалистами разных стран.*

### Начальный этап понимания проблемы

Первые железнодорожные экипажи имели простые цилиндрические колеса, которые катились по рельсам из полосового металла с закраинами и направлялись ими. По мере развития техники появились конические колеса, а выступы переместились с рельсов на внутреннюю грань колеса. Возможно, сначала это было обусловлено производственными обстоятельствами и стоимостью материала, но вскоре выявились технико-эксплуатационные преимущества данной системы в отношении движения экипажей по рельсовому пути и определилась кон-

струкция колесных пар, которые до настоящего времени используются на всем железнодорожном подвижном составе. Принцип движения колесных пар с коническими колесами по рельсам стал относительно понятен уже в 1821 г., когда Стефенсон (Stephenson) отмечал: «Колеса имеют конусность, т. е. их наружный диаметр несколько меньше (примерно на 3/16 дюйма, или на 4,7 мм) внутреннего. Тогда под воздействием небольших неровностей рельсовой колеи в плане они слегка смещаются вправо или влево. В последнем случае, например, левое колесо начинает катиться по рельсу по большему, а правое — по меньшему диаметру поверхности катания, что вызывает у правого колеса ослабление сцепления по сравнению с левым. При попеременном усилении или ослаблении сцепления того или иного колеса возникает легкое виляние колесной пары в рельсовой колее» (цитируется по опубликованной в 2003 г. работе Виккенса (Wickens), в которой дан всеобъемлющий авторитетный обзор исследований в этой области).

Разные исследователи последовательно выводили с все возрастающей точностью уравнения, описывающие это движение. Редтенбахер (Redtenbacher) в 1855 г. получил уравнение смещенной траектории качения колесной пары в кривой, основанное исключительно на разности диаметра внутреннего и наружного колес в точках контакта с рельсами. Клингель (Klingel) в 1883 г. вывел уравнение кинематических колебаний колесной пары. Точный рас-

чет движения колесной пары и экипажа как реакции на дискретные или случайные неровности пути оказался, однако, намного сложнее.

### Моделирование контакта колеса и рельса — пятно контакта и нормальные силы

Классическую теорию контакта разработал Герц (Hertz) в 1882 г., когда в 24-летнем возрасте служил научным сотрудником Берлинского университета. Герц доказал, что зона контакта качения между двумя неконформными телами должна иметь эллиптическую форму, и разработал метод расчета полуосей эллипса и распределения давления в пятне контакта. Теория Герца жестко ограничена случаем контакта свободных от трения поверхностей абсолютно упругих твердых тел, но она по-прежнему остается ценной исходной точкой для решения большинства задач контакта и включена в ряд компьютерных программ, связанных с контактом колеса и рельса.

В анализе рассматриваемой ситуации первым шагом является установление местоположения, размеров и формы пятна (или пятен) контакта. Поскольку профили поперечного сечения колеса и рельса могут иметь довольно сложную конфигурацию, в большинстве пакетов компьютерного моделирования подразумевается использование препроцессора, который совмещает профили колеса и рельса для данной колесной пары и конкретного участка рельсовой колеи и определяет, где имеет место контакт.

Сведения о профилях поперечного сечения получают из чертежей или по результатам измерений с использованием специальных устройств, подобных, например, широко известному прибору типа MiniProf. Параметры контакта устанавливаются для заданного поперечного смещения и угла поворота колесной пары вокруг вертикальной оси. Иногда это делается применительно к случаю жестких тел, в других случаях при определении местоположения контакта допускается учет влияния их упругости. Когда угол поворота колесной пары зависит от местоположения контакта, могут потребоваться итерации. Препроцессор контакта запускается всякий раз, когда необходимо детальное изучение контакта или для составления таблицы данных, по которой можно выполнить интерполяцию нужных величин.

Для характеристики эллиптических пятен контакта вокруг точки контакта в некоторых программных пакетах используется теория Герца. В качестве искомого выступает нормальная нагрузка в точке

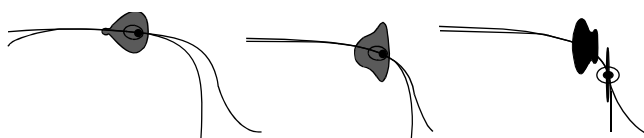


Рис. 1. Неэллиптические пятна контакта колеса и рельса

контакта, а для получения правильного распределения нагрузки между точками контакта следует применить итеративный расчет. В случае контакта между поверхностями катания радиусы в зависимости от места изменяются относительно медленно, а контактное пятно зачастую близко по форме к эллипсу. Однако в случае резких изменений радиусов или если контакт очень конформный, пятно контакта может быть совершенно неэллиптическим, и метод Герца не дает удовлетворительных результатов. Кноте (Knothe) и Хун (Hung) предложили в 1985 г. численный метод определения тангенциальных напряжений для неэллиптического контакта.

По так называемой мультигерцевой методике пятно контакта расчленяется на полосы, и для каждой из них контакт по Герцу рассчитывается отдельно. Для определения правильного распределения нормальных нагрузок поперек всего пятна контакта может потребоваться несколько итераций, если контакт рассматривается в качестве ограничения. Паскаль (Pascal) и Соваж (Sauvage) разработали в 1991 г. метод с использованием эквивалентного эллипса, в котором сначала рассчитывается мультигерцевый контакт, а затем он заменяется единичным эллипсом. Этот метод позволяет рассчитать эквивалентные силы. В методе, который разработали Кик (Kik) и Пиотровски (Piotrowski) в 1996 г., используется приближенная одношаговая аппроксимация. Полученные при этом результаты применительно к колесу типа S1002 и рельсу типа МСЖД 60 показаны на рис. 1. В так называемой полугерцевой методике, которую предложили Эйасс (Ayasse), Мопю (Maupu) и Шолле (Chollet) в 2000 г., контакт рассматривается как герцевый для продольной кривизны (вдоль рельса) и негерцевый для поперечной кривизны (поперек рельса).

### Моделирование контакта колеса и рельса — крип и силы крипа

В 1916 г. Картер (Carter) ввел понятие крипа, или микропроскальзывания между колесом и рельсом с возникающими при этом соответствующими силами. Более полное рассмотрение сил крипа дали в 1964 г. Вермейлен (Vermeulen) и Джонсон (Johnson), а в 1967 г. Калкер (Kalker) предложил полное теоретическое решение для общего трехмерного случая с произвольным проскальзыванием и вращением.

В соответствии с этой теорией Калкер разработал различные компьютерные алгоритмы для расчета сил крипа. Программа CONTACT, основанная на «точной» теории Калкера, включает негерцевый контакт, но она относительно медленна и непригодна для практического использования в численном интегрировании на каждом отрезке времени. Имеются подпрограммы табличного интерполирования,

такие, как USETAB, которые интерполируют величины сил крипа, предварительно вычисленные с помощью программы CONTACT. Программа FASTSIM основывается на «упрощенной» теории Калкера, которая предполагает эллиптическое пятно контакта с податливым промежуточным слоем между двумя жесткими телами.

Экспериментальные измерения на двухдисковом стенде, описанные Бриклом (Brickle) в его диссертации 1973 г., и испытания, которые провел Иллингворт (Illingworth) в том же году на катковом испытательном стенде, подтвердили результаты Калкера при условии, что контактирующие поверхности свободны от загрязнений. Хоббс (Hobbs) в 1967 г. предположил, что коэффициенты Калкера для учета нормальных уровней загрязнения должны быть умножены на 0,6.

Эвристические методы прогнозирования, которые были первоначально разработаны Вермейленом и Джонсоном, основаны на применении кубического уравнения для расчета сил крипа, близкого к насыщению. Шен (Shen), Хедрик (Hedrik) и Элкинс (Elkins) в 2000 г. разработали широко используемый и весьма быстродействующий метод, но получаемые при этом результаты — приближенные, и их точность снижается при высоком спине (относительном вращении вокруг нормальной оси). Полак (Polach) в 2003 г. предложил метод, который хорошо работает при высоком уровне крипа и спина, а также включает падающую величину коэффициента трения при повышении скорости проскальзывания.

Если имеет место существенный эффект шероховатости поверхности, он воздействует на характеристики и силы крипа. Бухер (Bucher), Кноте и Тайлер (Theiler) в 2002 г. предложили метод исследования этой ситуации. Ранее Кноте и Гросс-Тебинг (Gross-Thebing) в работе 1986 г. также рассматривали эффект быстро изменяющихся характеристик крипа, которые прежде не учитывались. Когда параметры контакта рассчитываются с помощью негерцевых методов, следует использовать модифицированную версию программы FASTSIM, как указали Кик и Пиотровски.

### **Моделирование динамики железнодорожного подвижного состава**

После некоторого прояснения картины контакта между колесом и рельсом открылись возможности для более полного анализа динамики железнодорожных экипажей. Эта инициатива была поддержана в 1950 г., когда Бюро исследований и экспериментов (ORE) Международного союза железных дорог (МСЖД) учредило премию за лучший анализ устойчивости двухосного железнодорожного экипажа. Первыми лауреатами премии стали Поссель (Possel),

Бутфуа (Boutefoy) и Мацудайра (Matsudaira). В своей работе 1960 г. они использовали линейный анализ при решении проблемы, но затем Де Патер (De Pater) сформулировал задачу виляния как нелинейную. Позднее, в 1964 г., Ван Боммел (Van Bommel) опубликовал нелинейные уравнения движения двухосного экипажа, используя профили колеса и рельса и закон взаимосвязи сил крипа и микропроскальзывания, полученный Мюллером (Müller).

С появлением аналоговых, а затем и цифровых электронных вычислительных машин стало возможным решать уравнения применительно к конкретным задачам и проще учитывать нелинейности.

Группа специалистов Британских железных дорог во главе с Виккенсом в ходе исследования динамической устойчивости колесных пар и тележек с профилированными колесами (1965 г.) усовершенствовала процедуру анализа, включив понятие колесной пары как механизма обратной связи, и впервые применила методы аналоговых, а затем и цифровых вычислений. Результаты данной работы воплотились в создании нового двухосного грузового вагона с существенно повышенной устойчивостью при движении с высокой скоростью, а также послужили основой для проектирования опытного высокоскоростного пассажирского поезда АРТ и разработки усовершенствованного программного обеспечения, до настоящего времени используемого в Великобритании.

Мюллер в 1965 – 1966 гг. провел один из первых экспериментов по моделированию движения четырехосного вагона в кривой на аналоговой вычислительной машине. Он также отметил в 1960 г. важность учета нелинейности профилей колеса и ввел табулированные геометрические параметры, полученные при измерении различных сочетаний колес и рельсов с изношенными профилями. Впоследствии эти данные использовали Купрайдер (Cooperider) и др. при разработке алгоритма одновременных измерений профилей колеса и рельса с целью получения нелинейных параметров, таких, как разность диаметров качения колес и контактные углы, для колесной пары, смещающейся в поперечном направлении относительно оси пути.

В первых программах наблюдалась тенденция к разложению общей картины взаимодействия подвижного состава и пути (чтобы упростить вычисления). Примером могут служить программы расчета расположения экипажа в рельсовой колее и сил, возникающих при установившемся вписывании в кривую. Анализ собственных значений линейных или линеаризованных уравнений движения был использован для получения информации о собственных частотах и форме колебаний, а также для прогнозирования ограничений устойчивого движения. Если система нелинейная, можно применять пошаговое интегрирование во времени, но такое интегрирова-

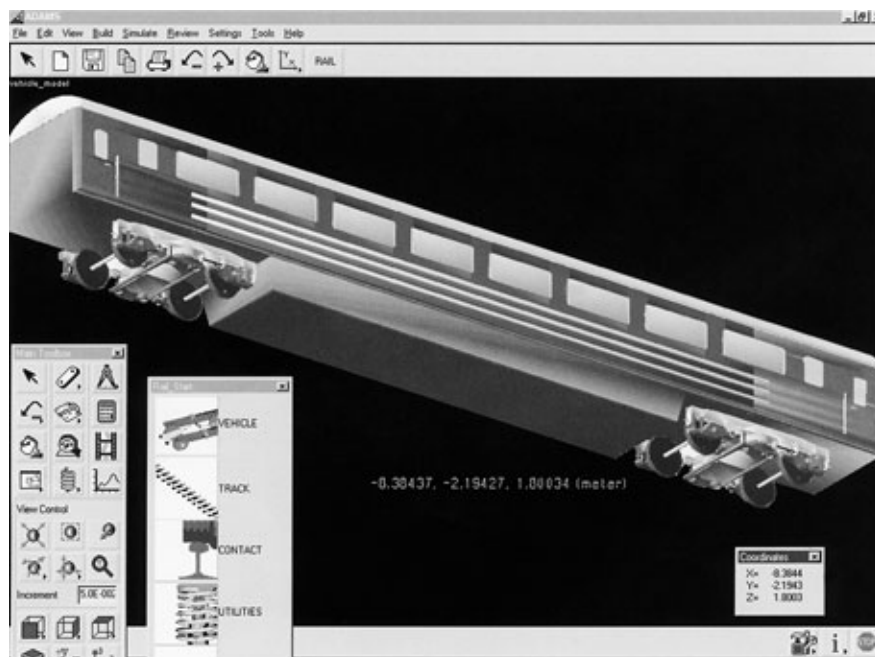


Рис. 2. Графический интерфейс пользователя программы ADAMS/Rail с моделью вагона

ние стало необходимым для разделения вертикального (включая резкие толчки и галопирование) и горизонтального (виляние, поворот относительно вертикальной оси и раскачивание) движения. Продольная динамика, которая важнее в случае длинных грузовых поездов, также рассматривалась отдельно. По мере нарастания мощности компьютеров все меньше ощущалась необходимость в изучении каждого аспекта движения экипажа отдельно и расширилось использование мощных численных методов расчета во временной области, пока не потребовались выходные результаты в частотной области.

Теория динамики многих тел используется с целью составления уравнений движения для многотельной системы и их обработки с помощью решающего устройства, которое выдает необходимые результаты. Обзор основных программных пакетов моделирования таких систем и методов, применяемых

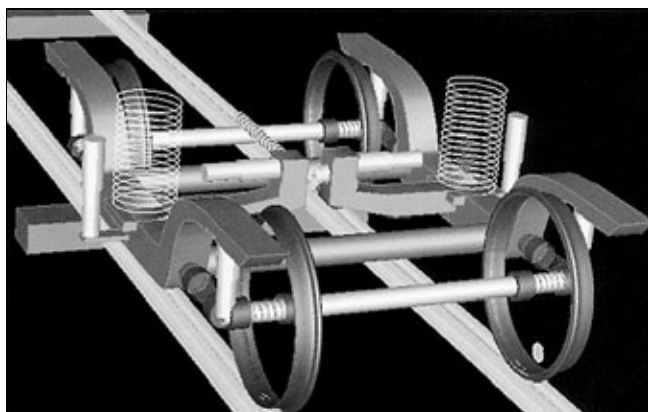


Рис. 3. Параметризованная модель тележки для программы ADAMS/Rail

в этих программах, опубликовал в 1990 г. Шилен (Schiehlen).

Трю (True) в 1994 г. использовал теорию нелинейной динамики применительно к режиму движения подвижного состава и показал, что отказ от рассмотрения нелинейности контакта колеса и рельса может привести к неточной оценке критической скорости экипажа. В 2003 г. Шупп (Schupp) описал метод, использующий численный анализ бифуркаций для моделирования нелинейного движения экипажа. Эти методы привели к созданию программного обеспечения PATH, используемого совместно с SIMPACK.

Первые программные пакеты использовали текстовый интерфейс, в котором параметры транспортного средства перечислялись в определенном порядке или при-

менялись ключевые слова для обеспечения ввода данных при моделировании. Затем был включен дружелюбный графический интерфейс и разработаны программные продукты, позволившие исследовать эффект внесения изменений в любую часть системы и анимировать вывод. Примером может служить продукт ADAMS/Rail, в котором пользователь работает с моделью подвижного состава с помощью графического пользовательского интерфейса, позволяющего взаимодействовать с моделью таким же образом, как и в системах автоматизированного проектирования (рис. 2 и 3).

Большое число компьютерных программ разработано железнодорожными организациями в качестве пособия при проектировании рессорного подвешивания и оптимизации пути и подвижного состава. Часть из них объединена в универсальные программные продукты, и некоторые из числа широко используемых в настоящее время приведены ниже (хотя это и не исчерпывающий перечень) с целью проиллюстрировать многообразие используемых сегодня программ.

Один из первых завершенных программных комплексов, MEDYNA, относящийся к динамике многотельных систем, был разработан Аэрокосмической исследовательской организацией Германии (DLR) совместно с компанией MAN и Техническим университетом Берлина. Пакет MEDYNA подразумевает изучение системы многих жестких тел с малыми их перемещениями относительно общей системы координат, которая может иметь большие смещения. Линеаризованные кинематические уравнения движения для каждого тела составлены относительно глобальной системы отсчета.

Позднее тот же коллектив DLR разработал программный продукт SIMPACK, и, поскольку он был предназначен как для автомобильных, так и для железнодорожных транспортных средств, в нем с самого начала можно было использовать нелинейную кинематику. Уравнения движения здесь сформулированы с применением относительных координат, и их можно составлять в символьном или числовом виде, явном или неявном. Кинематика упругих тел разработана с учетом составляющих второго порядка, чтобы стало возможным включить эффект повышения напряжений.

Одним из наиболее известных программных продуктов динамического моделирования является ADAMS. Он был выпущен на рынок моделирования железнодорожных экипажей в 1995 г. под названием ADAMS/Rail и первоначально включал методы исследования контакта колеса и рельса, заимствованные из пакета NedTrain, а в дальнейшем на лицензионной основе использовал элементы контакта колеса и рельса из программы MEDYNA.

Ассоциация американских железных дорог (AAR) финансировала разработку программы моделирования режима вписывания железнодорожного экипажа в кривую. В результате был создан универсальный программный пакет моделирования NUCARS. Этот пакет использовался, в частности, в исследованиях, направленных на улучшение динамики трехэлементных тележек грузовых вагонов.

Национальный институт транспортных исследований Франции (INRETS) разработал в 1987 г. программу моделирования многотельных систем VOCO с системой координат, допускающей моделирование движения экипажей в кривых большой длины. Программа с самого начала позволяла учитывать фрикционное демпфирование, поскольку первоначально использовалась для моделирования тележки типа Y25. Коммерческая версия этой программы, получившая в 1991 г. название VOCOLIN, позволила моделировать контакт колеса и рельса на основе мультигерцевого подхода. Иной подход использовали Соваж и Паскаль в 1992 г. при составлении программы VOCODYM.

В Великобритании Исследовательский институт железнодорожного транспорта разработал несколько компьютерных программ для анализа различных аспектов динамики железнодорожного подвижного состава. В настоящее время они объединены в один комплексный программный пакет VAMPIRE, поддерживаемый консультационной компанией AEA Technology Rail.

В Швеции моделирование железнодорожных транспортных средств с использованием компьютеров было начато компанией ASEA в 1971 г. Первоначально анализ выполнялся в частотной области с помощью линейных моделей, а затем, в 1973 г., была разработана нелинейная программа с интегрирова-

нием во времени. Эта программа предусматривала разделение поперечного и вертикального движения и была, в частности, использована в 1975 г. при проектировании опытного высокоскоростного поезда серии X15 и электровоза серии Rc4. В 1992 г. началась разработка новой программы для трехмерного расчета, и подготовка программного обеспечения была передана компании DEsolver. Эта новая универсальная компьютерная программа в едином пакете со всеми предшествующими и последующими программами получила в 1993 г. название GENSYS.

## Моделирование трения

Трение широко используется в системах рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава для рассеяния энергии, особенно в грузовых вагонах, где сравнительно низкая стоимость и простота делают ее альтернативой вязкостному демпфированию, которое более широко используется в пассажирских вагонах. В отличие от вязкостного демпфирования фрикционное приводит к нелинейностям, что иногда обуславливает жесткий режим движения.

Фрикционные элементы можно подобрать таким образом, чтобы демпфирование в подвешивании изменялось в зависимости от нагрузки, как это имеет место в широко используемых в Западной Европе тележках Y25 или используемых в Северной Америке и Восточной Европе трехэлементных тележках грузовых вагонов. Изменение демпфирования в зависимости от нагрузки особенно важно для грузовых вагонов, у которых отношение нагрузки к массе тары может быть очень большим и в ряде случаев приводить к конфликту между желательными параметрами. Ранее в грузовых вагонах широко использовались многолистовые рессоры, трение между отдельными листами которых обеспечивало рассеяние энергии.

Основы сухого трения хорошо известны из опыта. Это явление описывается уравнением Кулона (Coulomb):  $F = \mu N$ . Величина коэффициента трения  $\mu$  трудно определима с высокой точностью, и иногда ее приходится принимать в двух вариантах: один для случая до начала относительного проскальзывания трущихся поверхностей (коэффициент статического трения), другой — для случая, когда проскальзывание уже имеет место (коэффициент динамического трения), или рассматривать этот коэффициент как функцию скорости скольжения.

При компьютерном моделировании рессорного подвешивания использование численных методов приводит к необходимости решения задач высокой степени нелинейности, и при этом приходится прилагать большие усилия для поиска приемлемого алгоритма расчета силы трения надежным и эффектив-

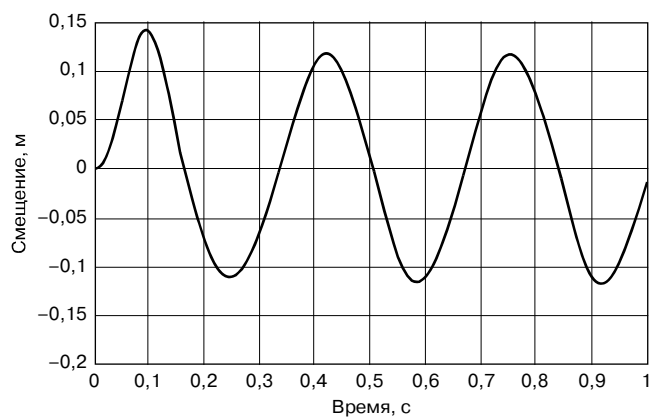


Рис. 4. Смещение подпружиненной массы во времени

ным образом, поскольку значимость сил трения в характеристиках подвешивания обуславливает важность точных результатов работы алгоритма.

С целью иллюстрации различий между существующими алгоритмами автор данной статьи совместно с Шолле и Эйассом собрал в институте INRETS информацию об алгоритмах, используемых в ряде программных пакетов моделирования, с точки зрения точности. Все эти алгоритмы были преобразованы в средах Matlab и Simulink, а расчетные силы оценивались для случая простого трения. Использовалась система подпружиненного груза, а возбуждение создавалось смещением одного конца пружины.

• **Алгоритм модели Массинга (Massing).** Основан на ряде элементов Дженкина (Jenkin) и используется в программных пакетах MEDYNA и ADAMS/Rail. Переключение с режима совместного движения в режим относительного проскальзывания регулируется силой поперек указанного элемента против ограничивающей величины силы трения.

• **Алгоритм модели Боссо (Bosso), Гульотта (Gugliotta) и Сома (Soma).** Здесь используется единственное математическое выражение для оценки сил тре-

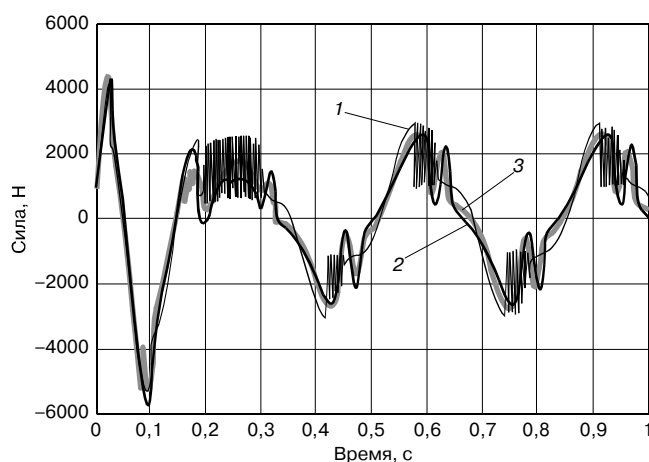


Рис. 5. Фрикционное демпфирование силы, воздействующей на подпружиненную массу, во времени:

1 — по Боссо и др.; 2 — по Эйассу и Мопю; 3 — по Массингу

ния, вследствие чего никакого переключения из режима в режим не требуется.

• **Алгоритм модели Эйасса и Мопю.** Используется в пакете VOCOLIN. Здесь силы трения рассчитываются исходя из внутренней жесткости и относительно смещения (если сила меньше  $\mu N$ ) или из величины небольшого внутреннего демпфирования и скорости относительного проскальзывания (если сила больше  $\mu N$ ).

Результаты исследования, проиллюстрированные на рис. 4 и 5, относятся к случаю возбуждения синусоидального смещения с частотой 3 Гц и амплитудой 0,1 м груза массой 50 кг при жесткости пружины 100 кН/м. Видна некоторая существенная разница в величине силы, хотя вариации смещения груза в целом небольшие, что обусловлено двойным интегрированием по ускорению и положению. Некоторые алгоритмы имеют тенденцию к колебаниям при определенных сочетаниях параметров. Такие колебания могут привести к отказу решающего устройства в случае многотельной системы, и их следует избегать. Продолжительность расчета по разным алгоритмам также заметно различается.

### Случай упругих тел

Большинство программных пакетов моделирования системы многих тел позволяют включать и упругие тела (такие, как кузов вагона), если изгиб или кручение значительные. При этом должна быть учтена информация о каждом виде деформации упругого тела, что часто делают с помощью анализа по методу конечных элементов, выполняемого вне рамок пакета моделирования.

Модели пути, используемые при моделировании системы многих тел, в целом представляют собой относительно простые модели одно- или двухслойных жестких тел, а состояние основания пути обычно принимается неизменным по его длине. Хотя такое допущение, по-видимому, адекватно для многих типов моделирования, оно в то же время не дает полного представления о всех динамических реакциях рельса.

Обзор разработок в этой области выполнил Кноте в 2001 г. Более детальные модели разработаны, например, компанией Corus Rail Technologies (CRT) как часть общей модели взаимодействия подвижного состава и пути (рис. 6).

Альтернативой отдельным моделям пути и экипажа является конечноэлементная (FEM) модель пути, включенная в программное обеспечение исследования динамики подвижного состава. Ее использование позволяет точно зафиксировать реакции пути и существенно повысить точность определения реакции вагона, что, в свою очередь, должно повысить точность определения сил во взаимодействии колеса и рельса. Данный подход в настоящее время реализу-

ется некоторыми программными пакетами моделирования. Успешным оказалось усовершенствование упругой конечноэлементной модели мостовых конструкций с использованием пакета ANSYS, включенного в систему ADAMS/Rail. В пакете SIMPACK исследуются упругие тела с использованием встроенного упругого элемента, названного SIMBEAM, а также конечноэлементного интерфейса под названием FEMBS. В большинстве конечноэлементных программных пакетов содержится файл стандартного ввода данных (SID), служащий для создания упрощенного модального представления всей конечноэлементной модели. По мере продолжающегося повышения быстродействия процессоров обработки данных может оказаться, что программы моделирования многотельных систем будут заменены программным обеспечением, основанным на анализе методом конечных элементов, которое позволит быстро обрабатывать системы упругих тел и выявлять ситуации, угрожающие с точки зрения концентрации напряжений и факторов усталости.

### Тестирование пакетов компьютерных программ по динамике подвижного состава

В силу большой сложности программных продуктов, разработанных для моделирования динамики железнодорожного подвижного состава, повысился интерес к сопоставлению результатов работы отдельных пакетов в определенных тестовых ситуациях.

В исследовании, инициированном на семинаре по использованию системы многих тел для решения задач динамики подвижного состава (1990 г.) и нашедшем отражение в работе Кортума (Kortum) и Шарпа (Sharp), опубликованной в 1993 г., рассмотрены компьютерные программы, разработанные для моделирования контакта колеса и рельса применительно к одиночной колесной паре и тележке. Паскаль предложил тестировать колесную пару, с тем чтобы несколько участников тестирования рассчитали поперечное смещение колесной пары под воздействием боковой силы величиной 20 кН и определили значение этой силы, при котором вероятен сход с рельсов. При тестировании тележки по методике, предложенной Киком и Паскалем, надлежало охарактеризовать поведение экипажа вагона во время его движения в прямом и кривом участках пути с разной скоростью. В этих экспериментах участвовали не все программы, но в ряде случаев были получены интересные результаты.

В ходе проведенного в Манчестере (Великобритания) тестирования объектами исследований были обычные вагоны двух типов и путевые структуры четырех типов. Это позволило сопоставить возможности программных пакетов компьютерного моделирования применительно к динамике железнодорожного подвижного состава в разных условиях. В

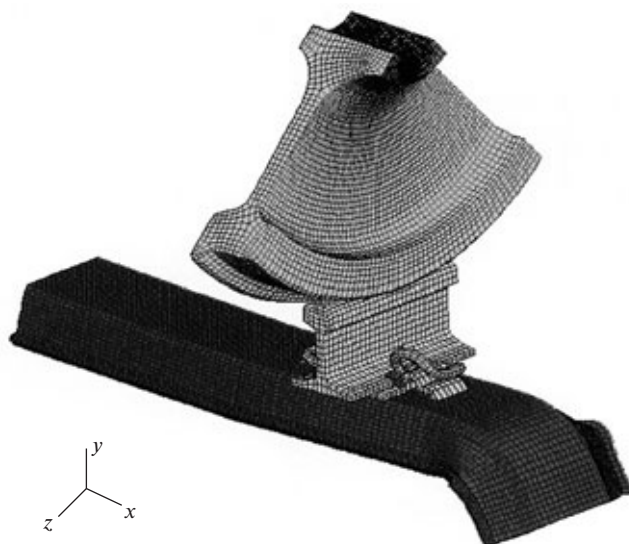


Рис. 6. Модель взаимодействия колеса и рельса компании CRT

данном случае моделирование выполнялось с помощью пяти основных пакетов (VAMPIRE, GENSYS, SIMPACK, ADAMS/Rail/MEDYNA и NUCARS), и его результаты были опубликованы в 1999 г. Одной из целей тестирования была попытка стимулировать железнодорожные администрации к принятию практики компьютерного моделирования с использованием какого-либо известного отработанного и надежного программного пакета, а не изобретением собственного.

На выходе моделей для каждого исследуемого участка пути и вагона конкретного типа получены определенные результаты. Особый интерес представило моделирование ситуации риска схода с рельсов. Известно, что одним из наиболее существенных показателей, характеризующих данную ситуацию, является соотношение поперечной и вертикальной силы ( $L/V$ ) для каждого колеса. В кривой сходу обычно подвержено наружное колесо. Поэтому рассчитывалось, например, отношение  $L/V$  для наружного колеса первой по направлению движения колесной пары вагона одного из исследуемых типов. Результаты расчета приведены на рис. 7. Максимальная и потенциально опасная величина указанного отношения наблюдалась в месте искусственно созданного нарушения геометрии пути, предназначенного для исследования критических режимов работы рессорного подвешивания, причем все пять пакетов показали близкие результаты.

### Дальнейшие исследования

#### Прогнозирование контактной усталости при качении

Реальную проблему для железных дорог представляет зарождение и развитие трещин в рельсе и колесе вследствие контактной усталости при качении

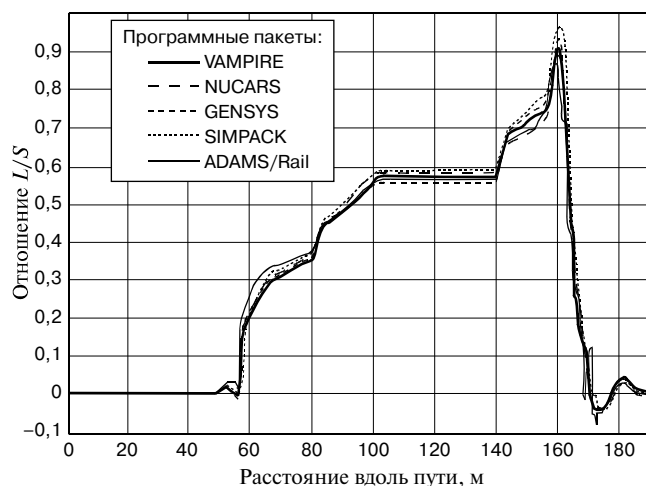


Рис. 7. Соотношение поперечной и вертикальной силы (результаты тестирования программных пакетов моделирования)

нии. Основные механизмы этого явления понятны, но точное прогнозирование момента возникновения трещины и оценка темпа ее распространения затруднительны. Несколько аварий, происшедших в последние годы из-за дефектов в рельсах, обострили внимание к этой проблеме, и некоторые инструментальные средства моделирования динамики подвижного состава были использованы в целях подготовки исходных данных для изучения усталостных явлений. Рингсберг (Ringsberg) из университета Chalmers в Швеции и Барстоу (Burstow) из компании AEA Technology в Великобритании разработали модели-прототипы, которые в настоящее время тестируются на базе реальных данных.

#### Моделирование изнашивания

При прогнозировании величины износа, возникающего на поверхности катания колеса и рельса, работа в зоне пятна контакта зачастую оценивалась произведением проскальзывания на силу крива. Ендель (Jendel) и Берг (Berg) показали, что в итеративной процедуре прогнозирования развития износа профиля колеса целесообразно использовать понятие так называемой групповой нагрузки, получаемой в результате динамического моделирования последовательного пропуска многих вагонов по данному участку рельсового пути. Йоханссон (Johansson) использовал модель процесса изнашивания, основанную на изучении дискретизированного пятна контакта, а Нильсен (Nielsen) рассматривал связь между износом головки рельса и ростом амплитуды волнообразных неровностей рельса.

#### Моделирование в реальном масштабе времени

Интересную разработку представляет собой функционирующий в реальном масштабе времени про-

граммный пакет VAMPIRE, который позволяет за счет последних достижений в области компьютерных технологий реализовать сверхвысокую скорость моделирования. Данные о состоянии пути можно вводить в этот пакет непосредственно с вагона-путеизмерителя, а поведение вагонов на данном участке пути прогнозировать в реальном времени. Все стандартизированные выходные результаты по динамике, например, грузового вагона конкретного типа можно получить с использованием модели, в которую введены данные, характеризующие такой вагон. Это позволяет собирать и обрабатывать любые данные о риске схода с рельсов, уровне комфорта для пассажиров, силах во взаимодействии пути и подвижного состава и т. п. с немедленной передачей их специалистам соответствующих служб для использования, например, при определении приоритетности тех или иных путевых работ.

#### Выводы

Развитие программных средств моделирования взаимодействия колеса и рельса и динамики железнодорожного подвижного состава в движении по пути ускоряется по мере роста вычислительной мощности современных компьютеров. И для первых аналоговых машин, и для мощных цифровых процессоров последних моделей разрабатывались уравнения, которые описывают местоположение контакта, распределение давлений и сил тангенциального крива, и на их основе составлялись компьютерные программы. Эти программы в настоящее время объединены в ряд мощных и надежных пакетов моделирования, часть которых упомянута в данной статье.

Этот инструментарий используют специалисты по проектированию и эксплуатации подвижного состава для уяснения его динамических характеристик во взаимодействии с путем. Продолжающийся прогресс в области вычислительной техники в настоящее время позволяет решать проблемы, связанные с упругими колесами и рельсами, контактом негладких поверхностей, контактом высокой конформности или с необходимостью учета высокочастотных динамических смещений. Наиболее быстродействующие компьютеры дают возможность осуществлять моделирование в реальном масштабе времени, благодаря чему разработку технико-эксплуатационных стратегий можно основывать на поведении виртуального подвижного состава и пути, прежде чем принимать решения о вводе в эксплуатацию реальных технических средств.