

М. И. УМАНОВ, к.т.н., доцент, ДИИТ (Украина);

В. В. ЦЫГАНЕНКО, к.т.н., доцент, ДИИТ (Украина);

А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР, к.т.н., доцент, ДИИТ (Украина);

Н. В. ХАЛИПОВА, к.т.н., доцент, Академия таможенной службы (Украина)

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПУТИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУТИ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Розроблена та випробувана теоретична модель взаємодії рухомого складу та колії, що являє собою одномасову систему з пружно-в'язкими характеристиками. Для вирішення задачі з удосконалення конструкції колії була розроблена її двомасова модель. Результати розрахунків, виконаних на базі цієї моделі, добре збігаються з результатами, одержаними при розрахунках на одномасовій моделі, а також даними натурних досліджень ДПТУ.

Разработана и успешно опробована теоретическая модель взаимодействия подвижного состава и пути, представляющего собой одномассовую систему с упруго-вязкими характеристиками. Для решения задач по совершенствованию конструкции пути была разработана его двухмассовая модель. Результаты расчетов на базе этой модели хорошо совпадают с результатами, полученными при расчете на модели с одномассовым основанием, а также данными натурных исследований ДИИТа.

The two-mass model of railway track interacting with rolling stock is elaborated. The results obtained with this model correspond with results obtained with the previously elaborated single-mass model of track and with results of field tests carried out by ДИПТ.

В Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДИИТ) в 2002-2006 г. проводились теоретические и экспериментальные исследования по определению допустимых скоростей движения поездов в прямых и кривых участках пути с учетом его состояния, а также вида подвижного состава.

Теоретические исследования выполнялись с использованием математической модели взаимодействия пути с грузовыми вагонами, разработанной под руководством профессора Дановича В. Д. [1, 2, 3].

В данной модели экипаж рассматривается как система, состоящая из 11 твердых тел (кузова, двух надрессорных балок, четырех боковых рам тележек и четырех колесных пар) с жесткими и упруго-фрикционными связями между ними. Железнодорожный путь представлен как одномассовая система с упруго-вязкими характеристиками в горизонтальном и вертикальном направлении, приведенная к каждому колесу вагона. Расчетная схема системы приведена на рис. 1.

Для описания колебаний тел системы введена система координат $Oxuz$, движущаяся вдоль пути по некоторому закону $s(t)$ (s – пройденное расстояние, t – время). Точка O лежит на уровне головок рельсов, ось Ox касается оси пути и направлена в сторону движения экипа-

жа, ось Oy лежит в плоскости пути и направлена вправо, если смотреть по направлению движения, а ось Oz нормальна плоскости пути и направлена вниз. Предполагается, что точка O движется с постоянной скоростью V (таким образом, $s=Vt$), а путь представляет собой прямую или кривую. Модель позволяет рассчитывать динамические показатели взаимодействия подвижного состава и пути, и на основе их анализа определять допустимые скорости движения поездов. Сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований ДИИТа, проведенных в прямых и в кривых участках пути, показало, что эти результаты хорошо согласуются между собой. На основе проведенных исследований [4] были разработаны рекомендации о допустимых скоростях движения грузовых поездов в прямых и кривых участках пути различных радиусов.

Решение задач по совершенствованию конструкции пути требует более подробной его модели. Для этого в существующую модель ввели ряд усовершенствований и дополнений. Первая группа дополнений касается более детального описания подрельсового основания. Единая масса пути, взаимодействующая с каждым колесом вагона, была разделена на массу рельса и основания. Примыкающая к каждому из колес часть верхнего строения пути моделируется как двухмассовая механическая система

с 4 степенями свободы, которые соответствуют перемещениям каждого «тела» в вертикальном и поперечном направлениях. «Тела» располагаются друг над другом. Верхнее соединено с нижним линейными (вертикальным и поперечным) упругим и вязким элементами. Так же

соединены второе тело и неподвижное основание. Колесо взаимодействует с верхним телом.

Приведенные массы верхнего строения пути в вертикальном и поперечном направлениях различны.

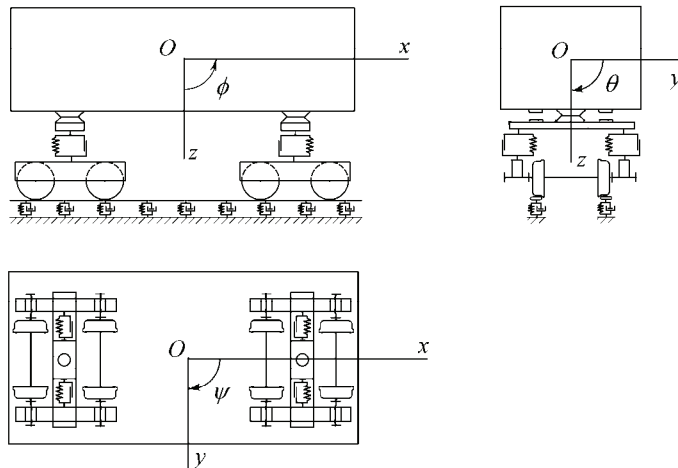


Рис. 1. Расчетная схема грузового вагона

Вторая группа изменений дает возможность более широкого представления пути и, в частности, рассмотрения смежных участков с различными геометрическими и упруго-вязкими характеристиками.

Задание геометрических параметров пути производится в трех секциях. Первая описывает кривизну оси пути, вторая – возвышение наружного рельса, третья – ширину колеи. Данный подход позволяет задавать различное количество участков пути с различными параметрами – прямых, участков с переменной и постоянной кривизной и шириной колеи. Возможно также задание каждой из секций со смещением координат начала и конца участка друг относительно друга. Модель позволяет описывать участки пути с отступлениями от норм содержания (например, таких, как несоответствия отводов кривизны и возвышения наружного рельса в кривой), смежные кривые, S – образные кривые, прямые вставки. Такой подход расширяет возможности модели для представления геометрических параметров пути. Для задания упруго-вязких параметров пути и приведенных к каждому из колес масс верхнего строения пути был проведен анализ исследований ЛИИЖТа, ВНИИЖТа, МИИТа, НИИЖТа, ДИИТа и ряда других по данному вопросу [5-8].

Третья группа изменений позволяет задавать различный профиль колеса, взаимодействующего с рельсом.

Расчетная схема верхнего строения пути, относящаяся к вертикальным перемещениям, приведена на рис. 2. Нижние числовые индексы, относящиеся к конкретному колесу, на схеме опущены. Для поперечных перемещений расчетная схема такая же, только на четверть оборота развернуты упругие и вязкие элементы. При этом вместо приведенной на рис. 2 вертикальной составляющей силы Z действует поперечная составляющая силы Y , а вертикальным перемещениям z соответствуют поперечные перемещения y .

Уравнения движения следующие

$$\begin{aligned} m_z^{n1} \ddot{z}^{n1} &= Z + C_z^{n1} (\dot{z}^{n2} - \dot{z}^{n1}) + \beta_z^{n1} (z^{n2} - z^{n1}), \\ m_z^{n2} \ddot{z}^{n2} &= C_z^{n1} (\dot{z}^{n1} - \dot{z}^{n2}) + \beta_z^{n1} (z^{n1} - z^{n2}) - C_z^{n2} \dot{z}^{n2} - \beta_z^{n2} z^{n2}, \\ m_y^{n1} \ddot{y}^{n1} &= Y + C_y^{n1} (\dot{y}^{n2} - \dot{y}^{n1}) + \beta_y^{n1} (y^{n2} - y^{n1}), \\ m_y^{n2} \ddot{y}^{n2} &= C_y^{n1} (\dot{y}^{n1} - \dot{y}^{n2}) + \beta_y^{n1} (y^{n1} - y^{n2}) - C_y^{n2} \dot{y}^{n2} - \beta_y^{n2} y^{n2}, \end{aligned}$$

где Y, Z – соответственно поперечная и вертикальная компоненты силы, действующей на рельс со стороны колеса; y^{n1}, y^{n2} – перемещения верхнего и нижнего тел в поперечном направлении; z^{n1}, z^{n2} – перемещения верхнего и нижнего тел в вертикальном направлении.

Для проверки адекватности модели с представлением основания как двухмассовой системы нами были выполнены расчеты показателей взаимодействия грузового полувагона (с типовым профилем колес) и железнодорожного пути в кривых радиусом 600 м.

Параметры пути были приняты одинаковыми под каждым из колес вагона.

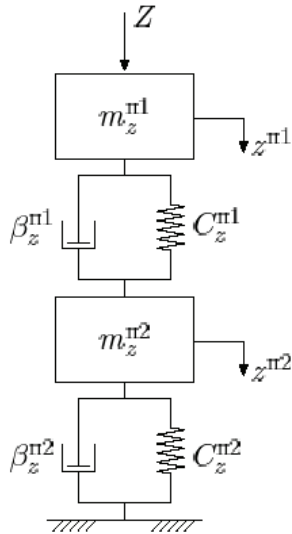


Рис. 2. Расчетная схема двухмассовой системы верхнего строения пути относительно вертикальных степеней свободы

Результаты были сопоставлены с аналогичными расчетами на модели при представлении основания как одномассовой системы, а также с результатами натурных испытаний ДИИТа.

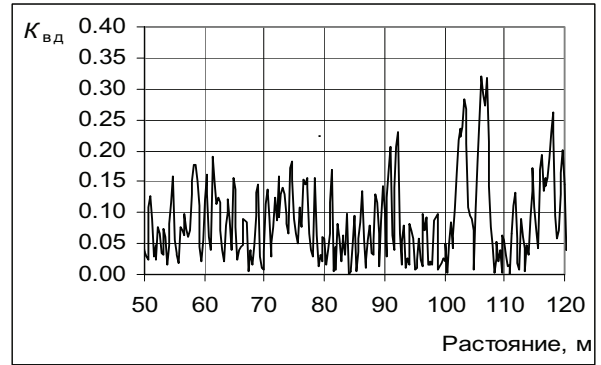
Рассчитывались коэффициенты горизонтальной и вертикальной динамики, а также коэффициент устойчивости против вкатывания гребня колеса на рельс. Параметры основания для исследуемой модели были заданы таким образом, чтобы они соответствовали модели с одномассовым представлением основания. Для этого «нижние тела» двухмассовой системы основания имели по сравнению с «верхними телами» значительно большую массу и жесткость, вязкость же принималась равной нулю. Параметры же «верхнего тела» модели с двухмассовым представлением основания совпадали с аналогичными параметрами пути в модели с одномассовым представлением основания.

Результаты расчета приведены в виде графиков на рис. 3, 4 (для двухмассовой модели основания – рис. 3а, 3в, 4а, 4в и для одномассовой модели основания – рис. 3б, 3г, 4б, 4г).

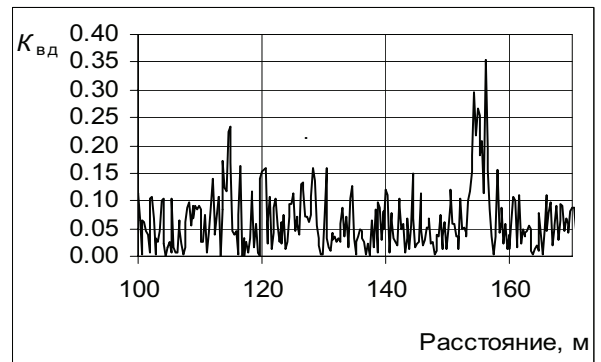
Для порожнего полувагона, движущегося в кривой радиусом 600 м со скоростью 70 км/ч, зависимости для коэффициента вертикальной динамики ($K_{вд}$) представлены на рис. 3а, 3б, а зависимости коэффициента устойчивости против вкатывания гребня колеса на головку рельса ($K_{уст}$) для такого же варианта расчетов – на рис. 3в, 3г.

Для груженого полувагона, движущегося в кривой радиусом 600 м со скоростью 90 км/ч,

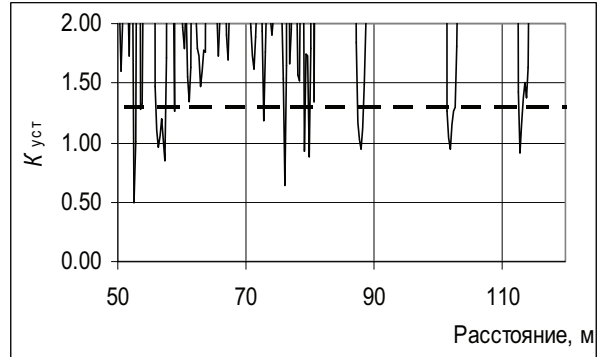
зависимости коэффициента вертикальной динамики представлены на рис. 4а, 4б, а зависимости коэффициента устойчивости против вкатывания гребня колеса на головку рельса – на рис. 4в, 4г.



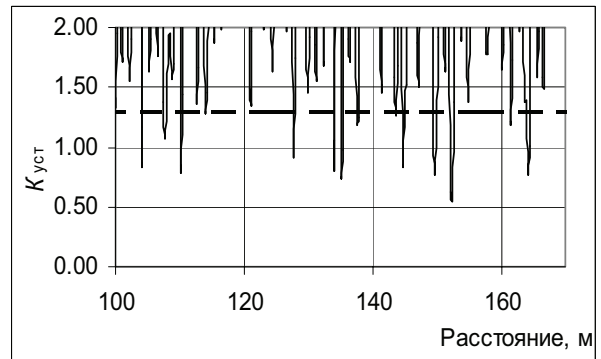
а



б

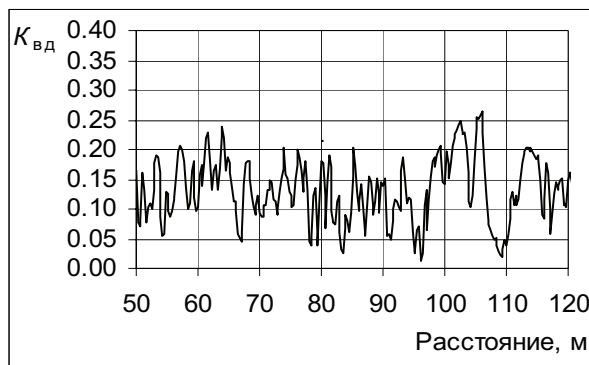


в

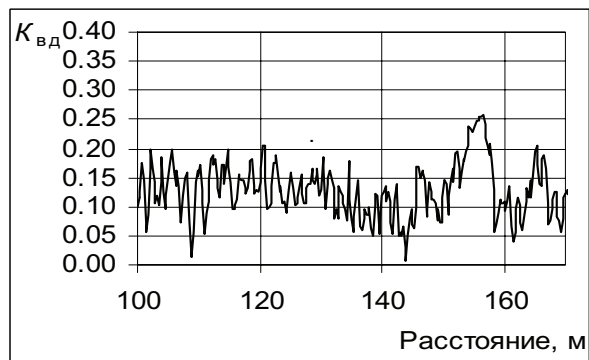


г

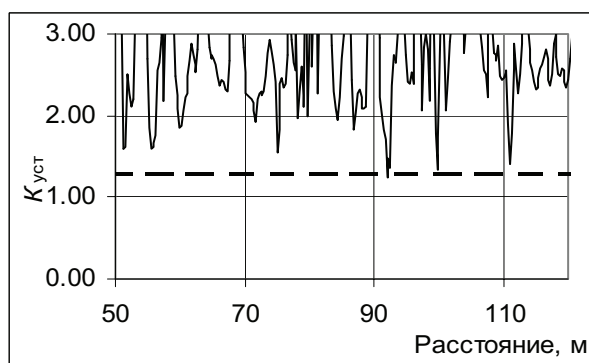
Рис. 3.



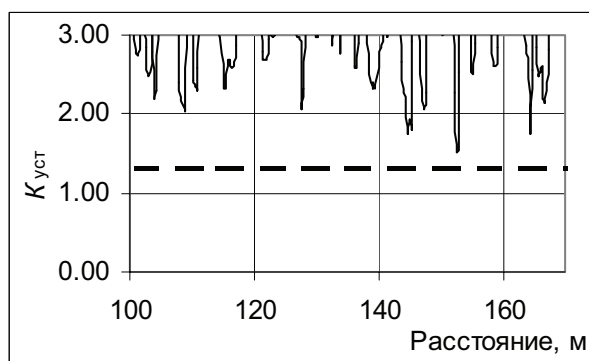
а



б



в



г

Рис. 4.

Расчеты показали, что исследуемые динамические характеристики взаимодействия подвижного состава и пути, полученные с помо-

щью модели с двухмассовым основанием, достаточно хорошо соответствуют характеристикам, полученным при расчете на модели с одномассовым основанием, а также данным натуральных исследований ДИИТа.

Это говорит об адекватности расчетов и о возможности использования усовершенствованной модели для исследования взаимодействия пути и подвижного состава при более широких возможностях представления геометрических и упруго-вязких характеристик пути, геометрического профиля колеса, а также для решения задач по совершенствованию конструкции пути.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данович, В. Д. Математическая модель взаимодействия пути и пассажирского вагона при движении по участкам произвольной кривизны [Текст] / В. Д. Данович, А. Г. Рейдемейстер, Н. В. Халипова // Транспорт: 36. наук. пр. Дніпропетр. держ. ун-ту заліз. трансп. – 2001. – Вип. 8. – С. 124-138.
2. Визначення впливу нерівножорсткості колії на показники взаємодії колії і рухомого складу [Текст] / М. І. Уманов та ін. // Вісник Академії митної служби України. – 2005. – Вип. 3. – С. 84-93.
3. Данович, В. Д. Уравнения движения железнодорожного экипажа в переходных и круговых кривых [Текст] / В. Д. Данович, А. Г. Рейдемейстер, Н. В. Халипова // Транспорт: 36. наук. пр. Дніпропетр. держ. ун-ту заліз. трансп. – 2002. – Вип. 10. – С. 86-91.
4. Определение допускаемых скоростей движения грузовых вагонов по железнодорожным путям колеи 1520 мм [Текст] / В. Д. Данович та ін. // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2003. – Вип. 2. – С. 77-86.
5. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
6. Гасанов, А. И. О приведенной массе пути [Текст] / А. И. Гасанов // Вестник ВНИИЖТ. – 1968. – № 6. – С. 52-53.
7. Определение расчетных параметров пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях с помощью вибромашины [Текст] / В. Ф. Яковлев и др. // Тр. ЛИИЖТ. – 1971. – Вып. 323. – С. 66-85.
8. Фришман, М. А. Еще раз об определении модуля упругости подрельсового основания [Текст] / М. А. Фришман, И. С. Леванков // Тр. ДИИТ. – 1965. – Вып. 57. – С. 4-8.

Поступила в редколлегию 24.07.2009