

Ю.М. ЧЕРКАШИН, канд. техн. наук, ФГУП ВНИЖТ МПС (Россия)
М.А. ЛЕВИНЗОН, д-р техн. наук, ФГУП ВНИЖТ МПС (Россия)
Г.С. МИХАЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, профессор, БГТУ (Россия)
Д.Ю. ПОГОРЕЛОВ, д-р физ.-мат. наук, профессор, БГТУ (Россия)
В.А. СИМОНОВ, канд. техн. наук, доцент, БГТУ (Россия)

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ, МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Викладено результати моделювання деяких ситуацій, що впливають на безпеку руху вантажних вагонів. Моделювання виконане за допомогою програмного комплексу «Універсальний механізм» з використанням достатньо повної моделі вагона-хопера.

Изложены результаты моделирования некоторых ситуаций, влияющих на безопасность движения грузовых вагонов. Моделирование выполнено с помощью программного комплекса «Универсальный механизм» с использованием достаточно полной модели вагона-хоппера.

Results of computer modeling of some situations influencing the safety factors of a freight railway vehicle with respect to the derailment are considered. Modeling is performed by means of the Universal Mechanism software with the use of sufficiently detailed models of the freight coach (hopper).

Для анализа условий, приводящих к сходу вагонов, предлагается использовать компьютерные модели вагонов и пути, которые достаточно подробно учитывают основные факторы, действующие во время схода. Такие модели вагонов с трехэлементными тележками типа ЦНИИ-ХЗ реализованы средствами программного комплекса "Универсальный механизм" в конфигурации UmLoco [1] (рис. 1...3).

Каждая тележка вагона типа 18-100 представлена совокупностью девяти твердых тел (включая клинья). Пружины рессорного подвешивания моделируются упругими линейными элементами, а для описания взаимодействия в точках контакта тел используются специально разработанные модели фрикционного контакта [2].

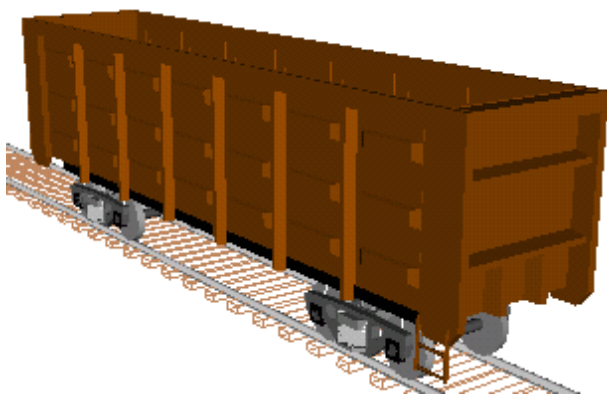


Рис. 1. Модель полувагона

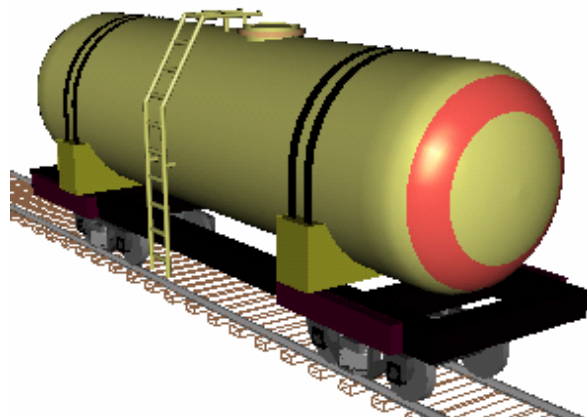


Рис. 2. Модель вагона-цистерны

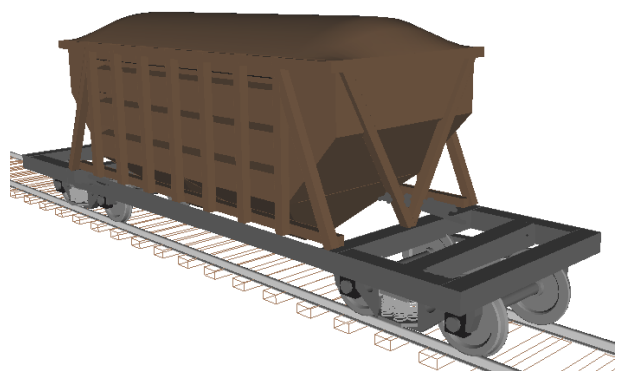


Рис. 3. Модель вагона-хопера

Модель вагона позволяет непосредственно учесть такие важные величины как физические параметры и геометрию, а, следовательно, за-

вышение и износ клина, прилегающих поверхностей боковин и надрессорной балки, геометрию и физические параметры зон контакта в пятниковом узле и боковин с буксами.

Модель пути представлена в виде безинерционного элемента с упруго-диссипативными свойствами в поперечном и вертикальном направлениях. Неровности в горизонтальном и вертикальном направлениях моделируются с помощью эквивалентных геометрических неровностей каждой рельсовой нити. В данном исследовании использованы неровности, измеренные ВНИИЖТ на одном из участков реального пути удовлетворительного содержания.

Движение вагонов рассматривалось на двух типах профилей колес: новых конических и типа ДМетИ. Последний был выбран потому, что он отражает основные особенности изношенных профилей (высокая приведенная конусность, одноточечный контакт с рельсом). В качестве основного профиля головки рельса был выбран неизношенный профиль Р65. Дополнительно рассматривались варианты с износом.

Для моделирования контактных взаимодействий в работе, в основном, использовался алгоритм FASTSIM с оценкой контакта по теории Герца. В арсенале программного комплекса UMLoco имеются другие возможности моделирования контакта и, в частности, использование негерцевской модели, что позволяет уточнить процесс взаимодействия колеса и рельса в случае неэллиптического контакта [3].

Оценка устойчивости движения вагона

Две проблемы предстояло решить прежде, чем выполнять исследования. Первая заключалась в выборе условий движения вагона, которые бы позволили выявить неустойчивость горизонтальных колебаний с учетом их связи с вертикальными через клиновую систему демпфирования. Вторая проблема связана с выбором критериев для оценки факта потери устойчивости.

Для решения первой проблемы рассматривалось движение вагона по идеально прямому в плане пути с единичной неровностью в начале. По вертикали путь был с обычными случайными неровностями. Горизонтальная неровность необходима для того, чтобы «расшевелить» клиновую систему в поперечном направлении. При этом вертикальные случайные неровности призваны обеспечить уровень поперечной составляющей демпфирования в клиновой системе, соответствующий реальным условиям движения вагона.

Достаточно обширный предварительный анализ показал, что для оценки потери устойчивости более всего подходит среднеквадратическое отклонение (СКО) SY или дисперсия DY поперечных смещений колеса относительно рельса. На рис. 4 и 5 представлено сравнение этого критерия с одним из альтернативных критериев – поворотом надрессорной балки относительно кузова.

Из рис. 4 видно, что при движении на профилях колес типа ДМетИ оба критерия одинаково хорошо определяют скорость, соответствующую потере устойчивости (порядка 14...16 м/с), так как на этих профилях возникает довольно жесткий режим возбуждения автоколебаний из-за высокой приведенной конусности профиля колес. На коническом профиле критерий поворота надрессорной балки не «видит» критической скорости (рис. 5). В то же время дисперсия смещений колеса позволяет определить критическую скорость – порядка 19...20 м/с. Графики на рис. 6 и 7 иллюстрируют как меняется частота и длина волны влияния при изменении скорости движения вагона с различными профилями колес.

После разработки методики оценки устойчивости был выполнен комплекс исследований с моделью порожнего вагона-хоппера по изучению влияния ряда параметров на критическую скорость вагона, в том числе: – завывшения (занижения) клиньев в диапазоне (-6...10 мм);

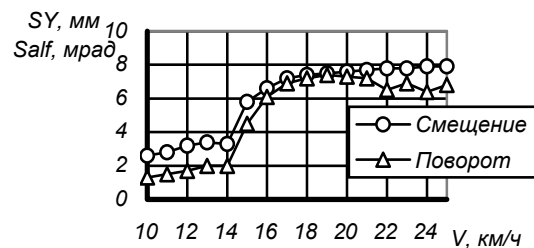


Рис. 4. Зависимость СКО критериев от скорости движения (профиль ДМетИ)

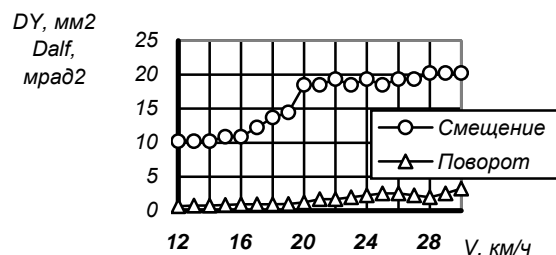


Рис. 5. Зависимость дисперсии критериев от скорости движения (конический профиль)

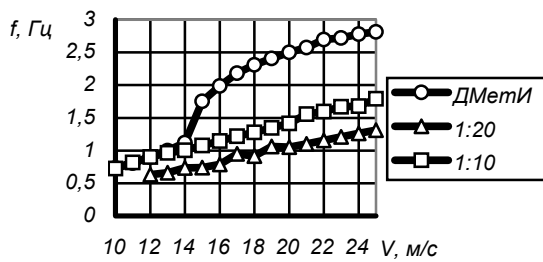


Рис. 6. Влияние профиля колес на частоту виляния вагона в прямых

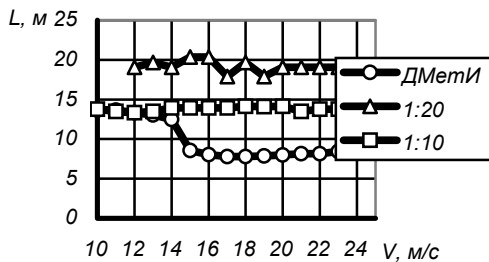


Рис. 7. Влияние профиля колес на длину волны виляния вагона в прямых

- коэффициента трения в контакте колеса и рельса (0,1...0,25);
- коэффициента трения в пятниковом узле (0,1...0,3);
- зазоров в опорах боковин на буксы за счет согласованного изменения поперечных и продольных зазоров в диапазоне (1...9 мм);
- шкворневой базы экипажа (5,87 м; 7,8 м; 8,65 м);
- ширины колеи (1516 мм; 1520 мм; 1528 мм);
- разности диаметров колес на величины 2, 4, 6 и 8 мм при различных сочетаниях колес в тележке;
- перекаса осей в плане за счет увеличения продольного расстояния между буксами одной стороны тележки на величины 2, 4 и 6 мм;
- подуклонки рельса (1:15; 1:20; 1:30).

Из-за ограниченности объема статьи нет возможности подробно рассмотреть полученные результаты, поэтому ограничимся краткими выводами.

1. Явно прослеживается тенденция к снижению устойчивости с увеличением завывшения клиньев. Так, при движении вагона с колесами, имеющими профиль ДМетИ, критическая скорость порожнего вагона-хоппера снижается с 15 до 10 м/с. Тенденция к снижению устойчивости прослеживается и при движении по кривым, хотя и в меньшей мере.

2. При снижении коэффициента трения между колесом и рельсом происходит размывание по скоростям зоны перехода от устойчи-

вого к неустойчивому движению (рис. 8). С уменьшением коэффициента трения устойчивость движения со скоростями, выше критической, растет.

3. Увеличение коэффициента трения в пятнике с 0,1 до 0,3 незначительно повышает критическую скорость вагона. Так, при движении вагона с колесами, имеющими профиль ДМетИ, она возрастает с 13 до 15 м/с.

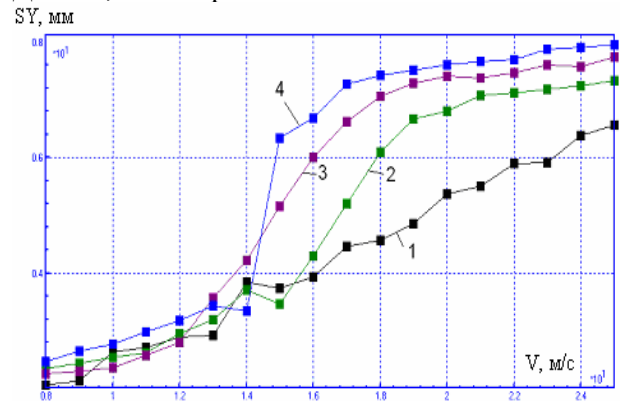


Рис. 8. Зависимость СКО поперечных смещений колеса по рельсу от скорости движения вагона с профилями колес ДМетИ:

- 1 – коэф. трения 0,1; 2 – коэф. трения 0,15; 3 – коэф. трения 0,2; 4 – коэф. трения 0,25

4. Устойчивость порожнего вагона-хоппера практически не зависит от зазоров в буксовых узлах и шкворневой базы экипажа.

5. Расширение (сужение) колеи не меняет критическую скорость движения вагона, только пропорционально меняются амплитуды колебаний.

6. Показатели устойчивости порожнего вагона на колесах с профилями ДМетИ слабо зависят от разности диаметров колес в диапазонах скоростей ниже 12 м/с (43,2 км/ч) и выше 16 м/с (57,6 км/ч). При движении вагона на конических профилях колес критическая скорость для неблагоприятных сочетаний в диаметрах колес тележки может понижаться с 18...20 до 14...18 м/с.

7. Перекас осей существенно влияет на устойчивость экипажа с профилями колес типа ДМетИ в диапазоне скоростей 14...22 м/с, причем увеличение перекаса улучшает показатели устойчивости в этом диапазоне. Увеличение перекаса от 0 до 6 мм увеличивает верхнюю границу зоны перехода от докритической к за- критической скорости с 16 до 22 м/с. Для экипажа с коническими колесами увеличение перекаса приводит к сглаживанию графиков зависимости СКО поперечных смещений колеса от скорости и при перекасе 6 мм уже нет харак-

терного скачка на графиках в районе критической скорости.

8. Имеется тенденция к увеличению критической скорости с уменьшением подуклонки рельсов. На всех рассмотренных скоростях движения экипажа на конических бандажах уровень показателя для подуклонки 1/15 значительно выше, чем для подуклонки 1/20 и 1/30, рис. 9. Для экипажа с колесами типа ДМетИ этот эффект выражен значительно меньше.

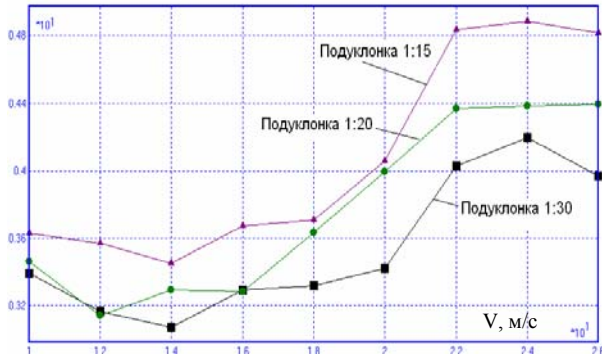


Рис. 9. Зависимость СКО поперечных смещений колеса по рельсу от скорости при различной подуклонке рельсов (новые конические профили колес)

Оценка динамических показателей вагона и их использование для обоснования выбора решений

Наряду с изучением устойчивости движения вагона выполнялась оценка динамических показателей. В качестве примера рассмотрим результаты использования оценок динамических показателей на выбор ширины колеи из трех альтернативных вариантов 1508 мм, 1520 мм и 1540 мм. При этом расстояние между кругами катания и нормы уширения колеи в кривых оставались стандартными. В данном случае исследования выполнены с применением следующих основных показателей динамики: а) боковые силы; б) рамные силы; в) коэффициент запаса устойчивости по всползанию гребня на рельс (коэффициент безопасности); г) работа сил трения гребней о рельс; д) работа сил трения в пятне контакта на поверхности катания рельса (в случае одноточечного контакта).

Для оценки большинства показателей, если это специально не оговорено, использовались максимальные на интервале наблюдения значения величин, измеренные на первой по ходу движения оси экипажа (среднее по трем максимумам с предварительным отбрасыванием наибольшего значения). Для оценки коэффициента безопасности аналогично использовались минимальные значения. Программа исследований предусматривала изучение движения вагона с

двумя типами профилей колес по прямому участку пути и по кривым радиусами 300 м и 600 м с различными скоростями.

С целью предотвращения заклинивания колесной пары при движении по зауженной до 1508 мм колее горизонтальные неровности левой и правой рельсовых нитей приняты синфазными. Выполненный в работе подробный общий анализ, как оказалось, содержит много неопределенностей, связанных с многообразием условий функционирования объекта исследований и противоречивостью рассматриваемых показателей. Например, при движении в прямой уширение колеи приводит к росту силовых показателей, но снижает износ профилей колес. Во многих случаях один и тот же показатель по разному чувствителен к изменению колеи в разных диапазонах скоростей и т.д.

Преодолеть отмеченные трудности можно, если использовать специальную методику свертки нескольких показателей качества с учетом всех рассмотренных условий функционирования [4]. Методика основана на иерархическом представлении условий функционирования объекта, которые вместе с альтернативами и показателями объединяются в единую схему. Такой подход позволяет на основе последовательного взвешивания приоритетов учесть практически все нюансы, заложенные в плане исследований и в полученных результатах расчетов. Пример такой иерархии представлен на рис. 10.

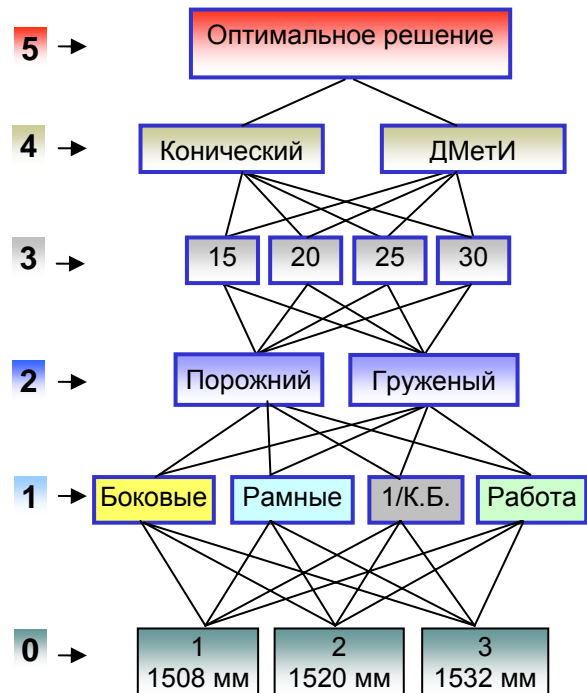


Рис. 10. Иерархическая схема обоснования выбора ширины колеи для прямых

На нижнем (нулевом) уровне расположены альтернативы, в качестве которых используем три значения ширины колеи. Над ними расположен уровень с динамическими показателями, используемыми при исследовании. Показатели отражают качество функционирования объекта. На следующих трех уровнях расположены элементы, отражающие условия функционирования объекта. Наконец, на верхнем уровне расположен общий показатель, отражающий приоритет альтернатив по всей совокупности частных показателей и условий функционирования объекта.

Следует отметить, что последовательность уровней 2, 3 и 4 может быть и иной. Например, уровень 2 и 3 можно поменять местами. Это равносильно изменению точек зрения на один тот же объект анализа и определяется предпочтениями, которые могут быть учтены при анализе. При этом может поменяться и топология схемы обоснования.

Мы не будем подробно останавливаться на деталях получения результатов, а приведем лишь некоторые результаты. Предлагаемый способ анализа позволяет получить как общие интегрированные оценки альтернатив по всему множеству показателей и условий функционирования объекта, так и по любому их подмножеству. Так, например, на рис. 11 и 12 представлены графики, отражающие приоритет альтернатив при движении вагонов в прямых участках пути и в кривой $R=300$ м (порожних и груженых, на конических профилях и профилях колес типа ДМетИ, на разных скоростях движения). На рисунках меньшему значению соответствует больший приоритет.

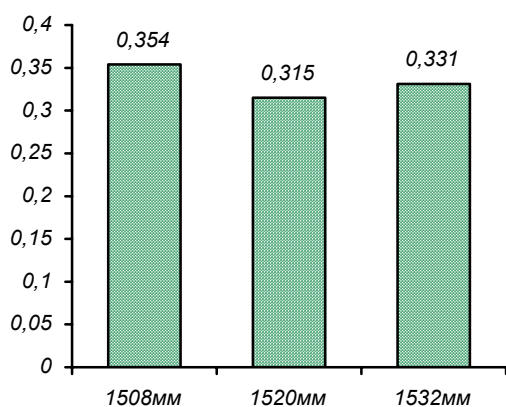


Рис. 11. Предпочтения значений ширины колеи для прямых участков пути

Из рис. 11 следует, что наиболее предпочтительной является стандартная ширина колеи

1520 мм. При этом, сужение более опасно, чем уширение. Для кривых участков пути предпочтительно уширение колеи (чем больше, тем лучше). Заметим, что результат будет зависеть от набора принятых во внимание показателей и условий функционирования объекта. Очевидно, если ввести показатель, ограничивающий предельное значение ширины колеи, то результат анализа при движении по кривым будет иной.

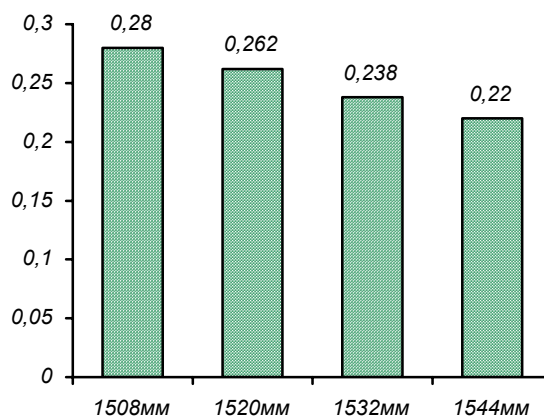


Рис. 12. Предпочтения значений ширины колеи для кривой $R=300$ м

Анализ ситуаций схода вагонов

Для этого, по-возможности, точно моделировалось состояние пути и сошедшего вагона. При этом, из-за неопределенности некоторых факторов выполнялся анализ множества возможных состояний с оценкой показателей, определяющих опасность схода.

Для проведения исследований использована модель ow_uwz программного комплекса "Универсальный механизм" с параметрами порожнего вагона хоппера модели П-715. Одна из проанализированных ситуаций предполагала движение вагона по S-образной кривой при условии, что на первом участке кривой происходит заклинивание наддрессорной балки в пятнике. Одновременно предполагалось воздействие импульса пары поперечных сил, приложенных к автосцепкам и создающих момент относительно вертикальной оси. Анализировались коэффициенты безопасности по всползанию колеса на рельс при различных положениях (по углу поворота в плане) заклинивания балки. На рис. 13 и 14 приведены характерные осциллограммы изменения коэффициента безопасности в районе выхода экипажа из кривой и начала прямого участка пути (на отметке 370 м).

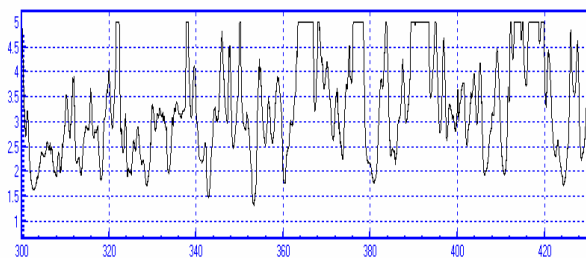


Рис. 13. Коэффициент устойчивости на третьей оси
(угол заклинивания 0,01 рад)

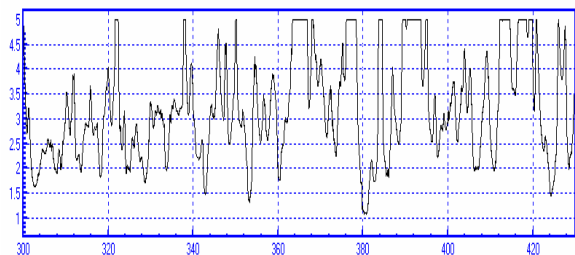


Рис. 14. Коэффициент устойчивости на третьей оси
(угол заклинивания 0,01 рад + импульс
момента силами 20 кН в интервале 379...383 м)

Из рисунков следует, что действие момента при наличии заклинивания может привести к опасному с точки зрения схода состоянию. Коэффициент безопасности снижается до 1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михальченко Г.С., Погорелов Д.Ю., Симонов В.А. Совершенствование динамических качеств подвижного состава железных дорог средствами компьютерного моделирования // Тяжелое машиностроение. – 2003. – № 12. – С. 2-5.
2. Погорелов Д.Ю., Павлюков А.Э., Юдакова Т.А., Котов С.В. Моделирование контактных взаимодействий в задачах динамики систем тел // Динамика, прочность и надежность транспортных машин. – Брянск: БГТУ, 2001. – С. 11-23.
3. R. Kovalev, V.N. Yazykov, G.S. Mikhalechenko, and D. Yu. Pogorelov Railway Vehicle Dynamics: Some Aspects of Wheel-Rail Contact Modeling and Optimization of Running Gears // Mechanics Based Design of Structures and Machines, Volume 31, Number 3, 2003, pp. 315-335.
4. Симонов В.А. Иерархическая схема формирования комплексных показателей, определяющих ходовую динамику подвижного состава // Вестник Восточно-укр. нац. ун-та. – 2003. – № 9. – С. 46-52.