

точноукраинского национального университета имени В. Даля  
Кучма Ю. В. – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Прикладная математика» Восточноукраинского национального университета имени В. Даля  
Фесенко Т. Н. – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Прикладная математика» Восточноукраинского национального университета имени В. Даля

**Рецензент:** д.т.н., проф. Шишов В. П

УДК 624.21+629.4.015+004.942

**Круговова Е.А., Михеев Г.В., Кирьян В.И., Мальгин М.Г.**

**г.Брянск, г. Киев**

### **МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭКИПАЖЕЙ И МОСТОВ: НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ И ВЕРИФИКАЦИЯ**

Изложена методика компьютерного моделирования взаимодействия железнодорожного моста и движущегося по нему экипажа. Методика реализована в программном комплексе «Универсальный механизм» (ПК УМ). Задача решается в пространственной постановке. Объектом исследований может быть мост, и экипаж. Мост представлен упругой моделью, модель экипажа включает абсолютно твердые тела, шарниры и силовые элементы. Динамика и напряженно-деформированное состояние моста моделируется на основе данных, импортированных из внешних программ конечно-элементного анализа. Уравнения движения упругого моста выводятся с использованием модального подхода. Анализируется влияние числа и вида форм упругого моста, используемых для построения модели, на точность получаемых результатов. Приводится сравнение с расчетами полных конечно-элементных моделей мостов в других программах, а так же с экспериментальными данными. Сравняются результаты раздельного и совместного моделирования. Приводится оценка влияния колебаний моста на движущийся экипаж.

**Ключевые слова:** динамика систем тел, динамика упругих тел, модальный подход, подвижная нагрузка.

**Постановка проблемы.** Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года предусмотрено внедрение высокоскоростного движения и увеличение интенсивности перевозок на ряде направлений. Новые условия эксплуатации требуют методик, позволяющих оценивать состояние экипажей и путей. Актуальным вопросом является взаимодействие железнодорожного моста и движущегося по нему экипажа. Данная проблема может быть решена методом компьютерного моделирования. В задаче о взаимодействии моста и экипажа объектом исследования может быть как мост, так и экипаж. Поэтому методика исследований должна обеспечивать анализ взаимодействия в системе «мост - движущийся экипаж» с учетом их взаимного влияния.

**Анализ последних исследований и публикаций.** При исследовании взаимодействия железнодорожного экипажа и моста часто используются методики, в которых анализируется только вертикальная динамика системы (плоские расчетные схемы), мост представлен балкой, а воздействие со стороны экипажа моделируется движущейся сосредоточенной силой или распределенной нагрузкой [4, 5, 6]. Такие подходы не могут быть применимы для анализа пространственных колебаний. Моделирование

моста балкой исключает возможность детального исследования его напряженно-деформированного состояния. Заменяя воздействие экипажа сосредоточенными силами нельзя оценить воздействие моста на динамику экипажа.

**Цель статьи (или постановка задач).** Цель работы – развить методику моделирования динамики упругих тел применительно к телам, испытывающим воздействие подвижной нагрузки (железнодорожным мостам). Предлагаемая методика может быть использована для выявления опасных режимов движения и параметров поезда, а также особенностей конструкции моста, приводящих к резонансам. Большая амплитуда вибраций моста при резонансе может стать причиной потери контакта колес с рельсами и превышения уровня допустимых напряжений в элементах конструкций моста и экипажа. В работе приводится сравнение результатов моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм» (ПК УМ) согласно используемой методике с результатами расчета в других программах («NASTRAN», «MIDAS»). Сопоставляются результаты моделирования и экспериментальные данные. Приводится оценка влияния динамики моста на экипаж. Обсуждаются вопросы влияния числа упругих форм на точность получаемых результатов.

**Материалы и результаты исследования.** Компьютерное моделирование – эффективный способ анализа динамики железнодорожных мостов при движении по ним поездов. В докладе рассмотрена методика создания комплексной пространственной компьютерной модели, включающей железнодорожный мост и поезд, для анализа их совместной динамики (рис. 1). Данный подход реализован в программном комплексе «Универсальный механизм».

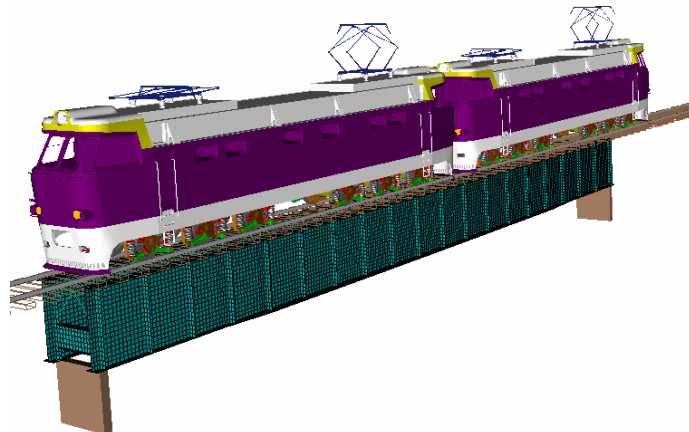


Рис. 1. Движение экипажа по мосту в программном комплексе «Универсальный механизм»

Железнодорожный мост и экипаж рассматриваются как механические системы, включающие абсолютно твердые и упругие тела [1]. Тела, составляющие модель экипажа, являются абсолютно твердыми. Упругие свойства моста описываются во внешней МКЭ программе («ANSYS», «NASTRAN»).

Уравнения движения тел с учетом упругости строятся с использованием метода присоединенной системы координат [2]. Малые упругие перемещения моста описываются методом суперэлементов с использованием модального подхода [3]. В отличие от полных конечно-элементных моделей такую модель будем называть редуцированной. Данные для редуцированной модели рассчитываются внешней конечно-элементной программой, после чего они импортируются в ПК УМ.

Силы в контакте колесо-рельс прикладываются к упругому мосту как подвижная нагрузка. Поскольку силы могут быть приложены только в узлах конечно-элементной сетки, реализован простой алгоритм распределения силы, приложенной в произвольной точке моста, между ближайшими узлами.

Движение поезда по мосту может исследоваться в двух режимах, которые будем называть раздельным и совместным моделированием. Совместная модель учитывает взаимное влияние динамики экипажа и моста. Раздельная, или упрощенная модель не учитывает прогибы и скорости точек моста при расчете сил в контакте колесо-рельс. То есть, раздельная модель применяется только для анализа динамики мостов.

В статье представлены результаты моделирования движения высокоскоростного и грузового поездов по мостам. Приводится сравнение результатов расчета перемещений, ускорений и напряжений в контрольных точках моста, полученных с использованием раздельной и совместной моделей. Точность моделирования с использованием представленного подхода оценивается путем сравнения с результатами расчетов полных конечно-элементных моделей моста, а также с экспериментальными данными.

Обсуждается влияние числа и вида упругих форм, используемых для создания модели моста, на точность результатов. Показано, что для моделирования с приемлемой точностью требуется, как правило, не более двухсот форм упругого моста. Результаты моделирования с использованием полных и редуцированных конечно-элементных моделей практически совпадают. Относительная разница измеренных в эксперименте и рассчитанных перемещений и напряжений моста составляет около 5 процентов.

Сравнение результатов совместного и раздельного моделирования для рассмотренных в докладе моделей не показало существенных отличий напряжений и прогибов – относительная разница не превосходит десяти процентов.

Показано влияние колебаний моста на движущийся экипаж (коэффициенты динамики, вертикальные и горизонтальные силы).

**Выводы.** Сходимость результатов, полученных с помощью используемой методики, с результатами расчета полной конечно-элементной модели в нескольких программах («NASTRAN» и «MIDAS»), а также с результатами натурных испытаний дает возможность рассматривать предложенную методику как средство детального анализа взаимодействия системы «мост-экипаж».

Для адекватного представления напряжений и деформаций моста достаточно использовать модели со 100-200 упругими формами.

Результаты совместного и раздельного моделирования отличаются тем сильнее, чем больше вес экипажа меньше жесткость моста. Поэтому в целом при анализе динамики системы «мост-экипаж» предпочтительнее использовать совместное моделирование.

#### Литература

1. Погорелов, Д.Ю. Введение в моделирование динамики систем тел: учебное пособие. – Брянск: БГТУ, 1997. – 156 с.
2. Shabana, A.A. Flexible multibody dynamics: review of past and recent developments // *Multibody System Dynamics* 1, 1997, pp. 189-222. Craig, R.R. JR. and Bampton, M.C.C.: Coupling of substructures for dynamic analysis // *AIAA Journal*, Vol. 6, No. 7, 1968, pp. 1313-1319.
3. Craig, R.R. JR. Coupling of substructures for dynamic analysis: an overview // In *AIAA Paper*, No 2000-1573, AIAA Dynamics Specialists Conference, Atlanta, GA, April 5, 2000.
4. Gong, L., and Cheung, M. S. Computer simulation of dynamic interactions between vehicle and long span box girder bridges // *Tsinghua Science And Technology*, Volume 13, Number 81, 2008.
5. Xia, H., Zhang, N. and De Roeck, G. Dynamic analysis of high speed railway bridge under articulated trains // *Computers and Structures* 81 (2003) 2467–2478.
6. Yang, Y. B., Yau, J. D. AND Wu Y. S. *Vehicle-Bridge Interaction Dynamics* // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004.

The present paper describes the CAE-based approach for analysis vehicle-bridge interaction dynamics. The approach is being implemented in Universal Mechanism software. The paper contains the results of researches, confirming the validity of presented procedure.

**Keywords:** multibody system dynamics, flexible multibody dynamics, vehicle-bridge interaction, moving load.

- Круговова Е.А. аспирант кафедры «Прикладная Механика» БГТУ, г. Брянск, Россия  
mail: [krugovova@umlab.ru](mailto:krugovova@umlab.ru)
- Михеев Г.В. к.т.н., доцент кафедры «Прикладная Механика»  
БГТУ, г. Брянск, Россия mail: [mikheev@umlab.ru](mailto:mikheev@umlab.ru)
- Кирьян В.И. д.т.н., член корр. НАНУ, институт электросварки  
им. Патона, г. Киев, Украина  
mail: [kiryan@paton.kiev.ua](mailto:kiryan@paton.kiev.ua)
- Мальгин М.Г. аспирант, институт электросварки им. Патона, г.  
Киев, Украина

**Рецензент:** д.ф.-м.н., проф. Погорелов Д.Ю.

УДК 621.891

**Горбунов Н.И., Ковтанец М.В., Цыгановский И.А., Крошко М.Н.,  
Левандовский В.А.  
г. Луганск**

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЕДИНИЧНОЙ АБРАЗИВНОЙ ЧАСТИЦЫ С ОЧИЩАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ РЕЛЬСА**

Выполнено математическое моделирование процесса формирования геометрических параметров поверхностного слоя при единичном взаимодействии абразивной частицы с поверхностью рельса, что в дальнейшем позволит прогнозировать шероховатость очищенной поверхности рельса при различных параметрах очистки. Предложено техническое решение, позволяющее повысить сцепные качества локомотива за счет управления фрикционными свойствами поверхностей трения колес и рельсов.

**Ключевые слова:** абразивная частица, колесо, рельс, коэффициент сцепления, загрязнение, микрогеометрия, струйно-абразивная очистка.

**Постановка проблемы.** На железнодорожном транспорте по сравнению с другими видами транспорта используется наименее затратный механизм передачи движения – трение качения, которое реализуется работой специфической системы качения – пары трения «колесо–рельс». Через колесо на рельс передаются все нагрузки от перевозимых грузов и массы подвижного состава, ускоряющие, замедляющие и направляющие силы, необходимые для движения поездов. Наиболее чувствительной характеристикой, интегрирующей процессы, происходящие в зоне трения колеса с рельсом, является коэффициент сцепления  $\Psi$ .

Опыт эксплуатации железных дорог и специально проведенные исследования [1, 2, 3] показывают, что реализуемые локомотивами коэффициенты сцепления могут изменяться от 0,06 до 0,45 и значительно отличаться от расчетных.

При анализе причин, приводящих к значительным изменениям величин коэффициента сцепления колес с рельсами, установлено, что существенное влияние на величину реализуемых коэффициентов сцепления оказывает изменение фрикционных свойств поверхностей трения колес и рельсов, зависящие от множества различных внешних факторов, к которым, в первую очередь, можно отнести: наличие на поверхности влаги, слоев органических и механических загрязнений.

**Цель статьи.** Разработка эффективного способа повышения сцепления в системе «колесо-рельс» путем очистки фрикционной поверхности рельса (или колеса и рельса), создание теоретической модели процесса взаимодействия единичной абразивной частицы с очищаемой поверхностью рельса

**Анализ последних исследований и публикаций.**