

УДК 629.4

*Д-р техн. наук В.В. Кобищанов,  
канд. техн. наук Д.Я. Антипин,  
асп. С.Г. Шорохов (Брянский гос. техн. ун-т)*

*Doct. of techn. sciences V.V. Kobischanov,  
cand. of techn. sciences D.Ya. Antipin,  
postgraduates S.G. Shorokhov*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

### **STUDY OF THE SAFETY OF PASSENGER CARS BY METHODS OF MATHEMATICAL MODELING**

Современные условия рынка пассажирских перевозок предъявляют все более высокие требования к обеспечению безопасности и комфортности перевозок [1]. Для обеспечения конкурентоспособности продукции российских производителей пассажирского подвижного состава необходимо иметь четко выстроенную методику прогнозирования параметров безопасности выпускаемой продукции еще на стадии проектирования. Над разработкой подобной методики длительное время трудится коллектив специалистов кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического

университета [2]. Поскольку в настоящее время экономические условия и временные рамки проектирования нового подвижного состава не позволяют проводить большого объема поисковых экспериментальных исследований, в основу разрабатываемой методики положены методы математического моделирования [3].

#### **1. Методика прогнозирования безопасности пассажирского подвижного состава железных дорог**

Методика рассматривает следующие аспекты обеспечения безопасности пассажирского подвижного состава железных дорог: безопасность движения и обеспечение регламентируемых

нормативной документацией динамических параметров; прочность несущих конструкций пассажирского подвижного состава во всех эксплуатационных режимах; надежность и долговечность подвижного состава.

Ядром разрабатываемой методики является математическая модель эксплуатации вагона, включающая в себя моделирование движения единиц подвижного состава в составе пассажирского поезда по реальным неровностям пути со скоростями вплоть до конструкционной с учетом профиля пути: по прямым участкам пути; в кривых различного радиуса; по различным типам стрелочных переводов; в режимах трогания с места, замедления и торможения; при маневровых соударениях. Инструментарием методики являются промышленные программные комплексы твердотельного моделирования и конечноэлементного анализа, имеющие мировую известность.

Предлагаемая методика прогнозирования безопасности подвижного состава включает в себя следующие этапы:

1. Создание твердотельной динамической модели эксплуатации подвижного состава. Модель учитывает все эксплуатационные режимы, характерные для рассматриваемой единицы подвижного состава. В результате моделирования оценивается безопасность движения по критериям, регламентируемым нормативной документацией, а также устанавливается соответствие динамических характеристик единицы подвижного состава нормативам [4] и техническому заданию. Также на первом этапе определяются динамические усилия, действующие на несущие конструкции кузова.

2. Разработка детализированных конечноэлементных моделей основных несущих элементов единицы подвижного состава. Оценка напряженно-деформированного состояния конструкции в статической и динамической постановке от действия статических нагрузок,

соответствующих расчетным режимам, регламентируемым Нормами [4], и динамических нагрузок, полученных на первом этапе. Безопасность оценивается путем сопоставления действующих статических и динамических напряжений с допускаемыми, приведенными в работе [4].

3. Оценка устойчивости элементов несущих конструкций подвижного состава, работающих на сжатие. Безопасность оценивается путем сопоставления действующих напряжений с критическими, рассчитанными для данной конструкции.

4. Определение наиболее нагруженных областей несущих конструкций и разработка их детализированных конечноэлементных моделей. Уточненная оценка напряженно-деформированного состояния узла несущей конструкции с использованием метода последовательного выделения областей. Безопасность оценивается сопоставлением уточненных значений напряжений с допускаемыми [4].

5. Анализ усталостной долговечности и живучести сварных соединений. Безопасность оценивается путем сравнения расчетных значений сроков службы до разрушения конструкции с установленными сроками службы единицы подвижного состава.

Методика апробирована на примере анализа безопасности пассажирского подвижного состава производства Тверского вагоностроительного завода.

## **2. Оценка безопасности движения и прогнозирование динамических характеристик пассажирских вагонов**

Безопасность движения оценивалась по следующим параметрам ходовой динамики: вертикальные, горизонтальные ускорения кузова и основных элементов ходовых частей; коэффициенты вертикальной и горизонтальной динамики кузова; коэффициент плавности хода; силы отжатия рельса; рамные силы; мощности сил трения в точках контакта колеса с рельсом по кругу катания и гребню; коэффициент устойчивости колесной пары

против схода с рельсов; коэффициент устойчивости вагона от опрокидывания; критическая скорость движения.

Коэффициент плавности хода определяется на основе полученных при моделировании движения вагона вертикальных и горизонтальных ускорений на полу кузова в зоне пятников, при расчете коэффициента плавности хода учитываются отфильтрованные ускорения в диапазоне частот от 0,5 до 20 Гц.

Мощности сил трения в точках контакта колеса с рельсом определяются как скалярное произведение силы крива и скорости колес относительно рельса в точке контакта. Указанный параметр может служить для сравнительной оценки износа поверхности катания колес.

Коэффициент устойчивости колесной пары против схода с рельсов рассчитывается тремя способами: по методике, рекомендуемой нормативной документацией на проектирование вагонов [4], а также по критериям М. Надаля [5] и Г. Вайнштока [5].

Для оценки безопасности движения пассажирских вагонов разработана динамическая модель пассажирского поезда, состоящая из восьмиосного пассажирского электровоза постоянного тока марки ЧС-7 производства чешской фирмы «Шкода» и двадцати пассажирских купейных вагонов с установками кондиционирования воздуха модели 61-4440 производства Тверского вагоностроительного завода (рис. 1).



Рис. 1. Динамическая модель пассажирского поезда:  
1 – подсистема «Локомотив»; 2 – подсистема «Пассажирский вагон»

Динамическая модель состава сформирована в среде промышленного программного комплекса моделирования кинематики и динамики систем тел «Универсальный механизм» (UM) с использованием метода подсистем [6].

Подсистема «Пассажирский вагон» представляет собой кузов в виде абсолютно твердого тела с реальными инерционными и геометрическими характеристиками, учитывающими реальное расположение оборудования и пассажиров, опирающийся через специальные элементы на твердотельные модели ходовых частей, представленных в виде подсистем более низкого уровня. Динамическая модель тележки представляет собой систему

абсолютно твердых тел, связанных между собой силовыми элементами и шарнирами.

Подсистема «Локомотив» аналогична модели вагона и дополнена электрической и механической подсистемами, описывающими тяговый электропривод и формирующими тяговые усилия колесных пар с учетом работы бортовых систем. При моделировании движения состава учитывались силы сопротивления движению, связанные с сопротивлением качению колеса, подъемами, кривыми участками пути и метеорологическими условиями.

При описании контактного взаимодействия колеса с рельсом рассматриваются два пятна контакта – по кругу катания и в зоне возможного касания гребня колеса с рельсом. Расчет сил крива

осуществляется в рамках алгоритма FASTSIM, основанного на линейной теории Калкера [7]. Алгоритм используется в условиях биконтакта для расчета сил крипа в обеих точках с учетом возможного износа колеса и рельса. Макрогеометрия кривых участков пути в плане определяется исходя из скорости прохождения кривой. Микронеровности пути принимаются в соответствии с данными, полученными при измерении реальных участков пути с учетом их состояния. Упруго-диссипативные характеристики верхнего строения пути принимаются для летнего периода при удовлетворительном состоянии пути и рельсов длиной 25 м, уложенных на железобетонные шпалы.

Взаимодействие подсистем «Локомотив» и «Пассажирский вагон» описывается через специализированные модели сцепных устройств, представляющих собой совокупность твердых тел, вращательных шарниров, контактных и упруго-диссипативных элементов.

Выводы о безопасности движения рассматриваемого вагона делаются на основе сопоставления полученных параметров с пороговыми значениями, приведенными в нормативной документации.

### **3. Оценка прочности несущих конструкций пассажирских вагонов в эксплуатационных режимах**

Оценка прочности производится в два этапа. На первом этапе производится анализ прочности конструкции в статической постановке от действия усилий, соответствующих режимам эксплуатации, регламентированным нормативной документацией [4]. Средством анализа является метод конечных элементов, реализованный в промышленных программных комплексах. В настоящем исследовании использовался программный комплекс SiemensPLMSoftwareFemap 9.0 с решателем NastranNX. На втором этапе производится уточненная оценка прочности в

динамической постановке. Расчеты производятся от динамических усилий, действующих на конструкцию в процессе эксплуатации. Графики изменения усилий во времени определяются при твердотельном моделировании эксплуатации вагона с использованием описанных выше моделей.

Оценка напряженно-деформированного состояния конструкции определяется на основе метода непосредственного интегрирования уравнений узловых перемещений или модального метода в зависимости от существующих вычислительных ресурсов и размерности моделей. При моделировании несущих конструкций в зависимости от поставленной задачи используются различные способы дискретизации моделей: пластинчато-стержневые расчетные схемы, пластинчатые модели и модели из объемных элементов.

Учет внутреннего трения в расчетных схемах осуществляется по гипотезе Фойгта. При моделировании динамики колебаний несущих конструкций совокупность действующих диссипативных сил заменяется эквивалентным вязким демпфированием, определяемым из равенства работ данных сил и сил вязкого сопротивления за период колебаний. Определение коэффициента эквивалентного вязкого демпфирования производится на основе коэффициента конструкционного демпфирования, обусловленного работой сил внутреннего трения. Преобразование конструкционного демпфирования в эквивалентное вязкое производится по первой частоте собственных изгибных колебаний конструкций.

Полученные в результате расчетов картины напряженно-деформированного состояния конструкции анализируются и при необходимости детального исследования наиболее нагруженных зон производится их вычленение с использованием метода последовательного

выделения областей [8]. В качестве примера на рис. 2 представлены конечноэлементные модели наиболее нагруженных областей кузова (место приварки шкворневой балки к хребтовой – рис. 2, а и рамы тележки – рис. 2, б).

Для элементов конструкций, работающих на сжатие, дополнительно проводится исследование возможности глобальной и локальной потери устойчивости с учетом геометрической и физической нелинейностей.

Безопасность несущих конструкций по критерию прочности осуществляется путем сопоставления уровней максимальных напряжений, полученных в статической и динамической постановке, с допускаемыми напряжениями, приведенными в нормативной документации. С точки зрения устойчивости безопасность определяется сопоставлением напряжений, действующих в сжимаемых элементах, с критическими напряжениями сжатия и сдвига.

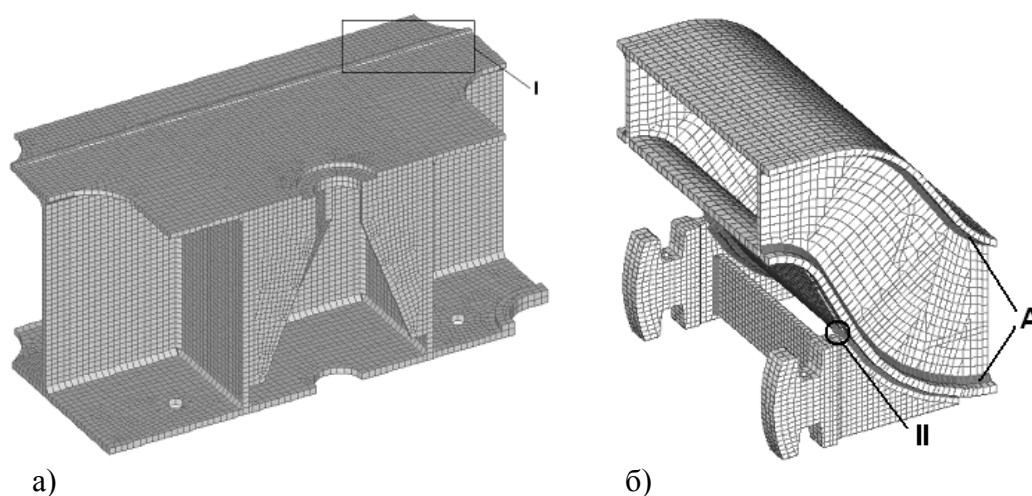


Рис. 2. Конечноэлементные модели наиболее нагруженных областей:  
а – кузова вагона; б – рамы тележки

#### 4. Оценка надежности и долговечности пассажирских вагонов

На основе зависимостей изменения напряжений в наиболее нагруженных сварных соединениях несущих конструкций пассажирских вагонов производится оценка усталостной долговечности и живучести конструкций с определением параметров надежности. В основу расчетов на сопротивление усталости положена модель многоциклового усталости, использующая линейную гипотезу суммирования усталостных повреждений [9] при случайном нагружении.

При расчетах уточненно учитываются коэффициенты концентрации напряжений в

сварных швах [10], а также остаточные сварочные напряжения и возможность поверхностной упрочняющей обработки швов. При этом в качестве источников повреждающего воздействия принимаются спектры динамических эквивалентных напряжений по гипотезе энергии формоизменения Мизеса, полученные в элементах конструкции по предложенной методике [11].

Анализ живучести несущих сварных конструкций производится на основании синергетической концепции повреждаемости деформированного металла при упруго-пластическом деформировании, разработанной В.С. Ивановой [12] с учетом реального

поведения поликристаллического материала с дефектами в условиях циклического динамического нагружения. В рамках принятой концепции нагружение конструкции рассматривается как сообщение ей энергии, расходуемой на деформацию. Поскольку в качестве критерия перехода от диссипации энергии путем пластической деформации к диссипации, вызванной микроразрушениями, принята предельная энергия деформации, ее критическое значение, являющееся константой материала, рассматривается в качестве энергетического критерия локальной прочности. Критическое значение предельной энергии деформации контролирует зарождение устойчивых зародышей микротрещин, способных к самопроизвольному росту.

Текущее значение предельной энергии деформации является суммой двух составляющих, первая из которых соответствует диссипации энергии путем дисторсии (изменения формы), вторая – дилатации (изменения объема). Обе составляющие текущего значения предельной энергии деформации могут быть выражены через нормальные и сдвиговые октаэдрические напряжения в упругой и упруго-пластической областях.

В случае циклического нагружения конструкции, приводящего к пластическим деформациям в локальной зоне предразрушения, происходит аккумулятивное накопление предельной энергии деформации пластической области до критического значения, при превышении которого происходит разрушение структурного элемента.

Так как при нагружении конструкции подводимая энергия распределяется по ее объему неравномерно и в зонах концентрации напряжений предельная энергия деформации значительно выше, оценка живучести несущей конструкции кузова проводится в локальном объеме зоны концентрации напряжений у вершины

трещиноподобного дефекта наиболее нагруженного сварного шва. При моделировании роста трещины рассматривался его дискретный характер, что особенно свойственно для циклического нагружения.

При анализе живучести сварных соединений в них вводятся трещиноподобные дефекты в виде подреза шва или микротрещины. Учет резкой концентрации напряжений и деформаций у вершины дефекта осуществлялся моделированием вершины с помощью сингулярных пятигранных объемных квадратичных элементов со сдвинутыми к вершине дефекта промежуточными узлами на  $\frac{1}{4}$  длины стороны. Размер сингулярных элементов принимался с учетом размера зерна поликристалла стали. Рост трещины моделируется последовательной заменой структурных элементов с уровнем предельной энергии деформации, превышающим критический, двумя конечными элементами с разъединенными узлами, устанавливающими русло трещины, и формированием новой вершины трещины у следующего за исключенными структурного элемента. Процедура расчета повторяется до выхода трещины на противоположную сторону шва и превращения ее в сквозную.

#### **Заключение**

Описанная выше методика была успешно применена при проведении прикладных научно-исследовательских работ в интересах Тверского вагоностроительного завода и Тверского института вагоностроения. В частности, с использованием методики выполнена оценка безопасности несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов моделей 61-4440, 61-4447, 61-4458, 61-4179, а также тележек безлюлечной конструкции модели 68-4075 с конструкционной скоростью 200 км/ч и модели 68-4095 с конструкционной скоростью 160 км/ч. Применение методики при проектировании указанных единиц подвижного состава позволило в 1,42 раза снизить затраты на

конструирование вагонов нового поколения моделей 61-4440, 61-4447 по сравнению с конструированием вагона модели 61-4179, в 1,38 раза снизить затраты на проектирование тележки модели 68-4095 по сравнению с ранее созданной тележкой модели 68-4075. Сроки выполнения работ

по данным конструкциям были сокращены в 1,9 раза, что, в конечном счете, привело к уменьшению стоимости жизненного цикла в среднем на 15-17% и повышению конкурентоспособности продукции вагоностроительных предприятий России.

### *Список литературы*

1. U.S. Government, 2011. Safety of Railroad Passenger Vehicle Dynamics: Final Report Summary. General Books LLC, pp: 54.
2. Kobishanov, V., Svetlov, V., Antipin, D. Analysis of durability of load – carrying structures of car running gears// Proceedings of the 6th intern.. Confer. on Railway Bogies and Running Gears. Budapest: 2006. - P 297-304.
3. Yi-Qing Ni, Xiao-Wei Ye, 2012. Proceedings of the 1st International Workshop on High-Speed and Intercity Railways. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp: 496.
4. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]. – М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
5. Iwnicki S., 2006. Handbook of Railway Vehicle Dynamics. CRC Press, pp: 552.
6. Pogorelov, D. Differential-algebraic equations in multibody system modeling. Numerical algorithms, pp. 183-194, 1998.
7. Kalker, J.J. Some New Results in Rolling Contact/ J.J. Kalker, J. Piotrowski. - Vehicle System Dynamics, 18 (1989).
8. Никольский, Е.Н. Расчет несущих конструкций по методу конечных элементов [Текст] / Е.Н. Никольский. – Брянск: БИТМ, 1982. – 99 с.
9. Jack A. Collins, Henry R. Busby, George H. Staab, 2009. Mechanical Design of Machine Elements and Machines. John Wiley & Sons, pp: 890.
10. Effect of factor in weld reinforcement of stress concentration factor /T. Terasaki, T. Akiyama, N. Yokoshima, et al. J/ Jap. Weld.Soc. – 1982.– N 9. - P. 66-72.
11. S.M.A. Kazimi, 1982. Solid Mechanics. McGraw-HillInc., pp:450.
12. Иванова, В.С. Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов [Текст] / В.С. Иванова. – М.: Наука, 1992. – 160 с.

**Ключевые слова:** безопасность, методика, пассажирский вагон, динамика, прочность, живучесть, усталостная долговечность, подвижной состав, конечноэлементная модель, твердотельное моделирование.

### *Аннотации*

Запропоновано методику оцінки безпеки пасажирського рухомого складу залізниць. Методика базується на методі математичного моделювання з використанням промислових програмних комплексів твердотільного моделювання і скінченноелементного аналізу. Критеріями безпеки пасажирського рухомого складу є забезпечення безпеки руху і регламентованих нормативною документацією динамічних параметрів, міцності несучих конструкцій у всіх експлуатаційних режимах, надійності і довговічності. Методика апробована на прикладі сучасних конструкцій пасажирських вагонів виробництва Тверського вагонобудівного заводу і впроваджується на вагонобудівних підприємствах Росії.

Предложена методика оценки безопасности пассажирского подвижного состава железных дорог. Методика базируется на методах математического моделирования с использованием промышленных программных комплексов твердотельного моделирования и конечноэлементного анализа. Критериями безопасности пассажирского подвижного состава являются обеспечение безопасности движения и регламентируемых нормативной документацией динамических параметров, прочности несущих конструкций во всех эксплуатационных режимах, надежности и долговечности. Методика апробирована на примере современных конструкций пассажирских вагонов производства Тверского вагоностроительного завода и внедряется на вагоностроительных предприятиях России.

The technique of evaluation of safety of the passenger rolling stock of Railways. The methodology is based on the methods of mathematical modeling with the use of commercial software complexes solid modeling and finite element analysis. Criteria of safety of passenger rolling stock are to ensure the safety and regulated by the normative documentation dynamic parameters, the strength of the bearing structures in all operating conditions, reliability and durability. The method was tested on the example of modern designs of passenger cars manufactured by the Tver carriage works and implemented on a car-building enterprises of Russia.