

# Пассивная безопасность пассажирского подвижного состава

**В марте 2005 г. в Берлине состоялся Пятый международный симпозиум по пассивной безопасности подвижного состава, на котором были представлены 12 докладов по следующим темам: нормативные требования к безопасности железных дорог, включая спецификации по технико-эксплуатационной совместимости (TSI); перспективные энергопоглощающие материалы и конструкции; устройства против наползания; классификация травм и система критериев безопасности пассажиров.**

Задачи мероприятий по усилению пассивной безопасности состоят в смягчении тяжести последствий инцидентов, если имеющиеся средства активной безопасности не смогли эти инциденты предотвратить. Часто забывают, что для технических систем не существует абсолютной безопасности. Наивысшая ее степень при наименьших расходах достигается только за счет рациональной комбинации мер активной и пассивной безопасности. За счет второй составляющей качественные и количественные характеристики перевозочной деятельности железных дорог могут быть улучшены значительно быстрее. Безопасность нельзя рассматривать только с точки зрения расходов, всегда важно учитывать качественные характеристики продукта в целом. Ниже приведены резюме докладов.

## Существующие и новые требования TSI для сочлененных поездов

*П. Сико (P. Sicot), Alstom Transport  
(г. Решоффен, Франция)*

Пассивная безопасность высокоскоростных поездов регулируется требованиями по технико-эксплуатационной совместимости (TSI). Новая редакция TSI внесла изменения в процедуру моделирования сценариев столкнове-

ний. Так, столкновение поезда с тяжелым препятствием на переезде следует моделировать с соблюдением условия деформируемости препятствия.

В качестве примера применения требований TSI можно взять новый высокоскоростной поезд типа AGV, который спроектирован сочлененным. В обычных поездах, где не используется принцип сочленения вагонов, поглощаемая энергия соударения передается по всей длине состава начиная с лобовой части головного вагона и далее от вагона к вагону. Исследования поведения поездов при столкновении показали, что энергопоглощающей способности головного вагона достаточно только при условии сравнительно низкого уровня ударной нагрузки. Преимущество поезда AGV с точки зрения пассивной безопасности заключается в том, что машинист остается в недеформируемой кабине управления, сохраняются узлы сочленения между вагонами, а все пассажиры подвергаются воздействию относительно невысоких отрицательных ускорений. Правомочность такой противоударной концепции была подтверждена многочисленными результатами численного моделирования и испытаний поездов в натуральную величину.

## Работы RSSB по пассивной безопасности

*Дж. Липтон (J. Lupton), Бюро безопасности и стандартизации на рельсовом транспорте (Rail Safety and Standards Board, RSSB, Лондон, Великобритания)*

За счет предоставляемых правилами средств RSSB координирует программу исследований, разработок и испытаний на железнодорожном транспорте Великобритании. Программа направлена на решение масштабных задач, причем основное внимание уделяется повышению безопасности на железных дорогах, а также снижению расходов на обеспечение ее должного уровня. В нее входят и такие проблемы эксплуатационной деятельности, как предотвращение проезда запрещающих сигналов и возникновения опасных ситуаций на переездах, а также связанные с оптимизацией поведения пассажиров, сокращением преступности и проявлений вандализма на железных дорогах. Кроме того, включены работы практически по всем техническим дисциплинам.

Значительная часть инженерно-технических исследований и испытаний связана с повышением пассивной безопасности подвижного состава. Проводимые работы сконцентрированы на снижении риска схода подвижного состава с рельсов, сохранении им вертикального положения и соосности относительно пути, защите персонала и пассажиров от травм и ранений, разработке путей эвакуации для обеспечения возможности покинуть вагон или место происшествия.

Отдельные аспекты исследований включают:

- улучшение конструкции подвижного состава, совершенствование средств для выявления и устранения препятствий на пути, а также средств личной защиты;
- изучение динамики поведения поезда в целом при столкновениях и повышение структурной сопротивляемости разрушению;

- разработку способов более эффективной защиты машинистов, в том числе повышение сопротивляемости разрушению элементов интерьера кабины, в частности окон, и определение критериев уровня травматизма и ранений;
- минимизацию риска от разлива и возгорания дизельного топлива;
- оптимизацию поведения пассажиров после аварии;
- аварийное освещение.

Проводятся также исследования с целью обобщения причин травматизма в прошлых инцидентах и оценки объема информации, которую необходимо регистрировать в случае возможных аварий для последующего анализа.

### **Перспективные энергопоглощающие материалы и структуры**

*Й. Баумайстер (J. Baumeister),  
Институт технологий и материаловедения им. Фраунхофера  
(Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Materialforschung,  
г. Бремен, Германия)*

Применение энергопоглощающих материалов является важным фактором повышения сопротивляемости разрушению железнодорожного подвижного состава. Примером в этой области является разработка металлической пены, основными преимуществами которой являются закрытые поры, низкая плотность, отличная способность к поглощению энергии, высокая специфическая жесткость, негорючесть, пониженная электрическая и тепловая проводимость, хорошее механическое и акустическое демпфирование и возможность вторичного использования. После освоения производства металлической пены с использованием технологий порошковой металлургии стало возможным исследовать механические качества алюминиевой пены.

Пригодность алюминиевой пены для поглощения энергии соударения была продемонстрирована

на примере выпускаемых ударопоглощающих устройств для вагонов трамвая и мотоциклов. Метод Advanced Pore Morphology Approach (APM) обеспечивает получение из пенных материалов структурных конструктивных элементов малого объема, которые соединяют друг с другом на этапе сборки. Выяснилось, что данный метод усиливает способность к энергопоглощению.

### **Проектирование устройств против наползания для деформируемых элементов при смещенном столкновении поездов**

*М. Зайцбергер (M. Seitzberger),  
Siemens Transportation Systems (Вена,  
Австрия)*

Одним из основных требований к пассивной безопасности является разработка мер против наползания единиц подвижного состава друг на друга при столкновении. Такие устройства должны по возможности ограничивать перемещения подъема в местах соприкосновения этих единиц, оказывая сопротивление вертикальным силам, которые вызывают сдвиг. Для перевода этих требований в технические решения возможны две принципиальные конструктивные концепции: зона деформации интегрируется в каркас кузова в торцевой части единицы подвижного состава или зона деформации образуется сминаемыми элементами, укрепленными на раме кузова, но не являющимися силовыми элементами кузова. Использование деформируемых элементов, укрепленных на раме кузова, имеет ряд преимуществ, таких, как ограничение сил смятия и отрицательных ускорений, а также простота замены торцевых частей после повреждения.

Особого внимания заслуживают следующие критические конструктивные критерии: поведение при столкновениях со смещением и ограничение наползания единиц подвижного состава друг на друга. Для решения этих проблем компа-

ния Siemens Transportation Systems разработала конструкцию сминаемого короба со встроенным направляющим механизмом. Здесь применен дополнительный внутренний направляющий профиль, который приваривается к плите, препятствующей наползанию, и имеет возможность перемещения вперед через многоячеечный (сотовый) сминаемый профиль и назад через базовую плиту. Разработка такого относительно простого конструктивного решения была осуществлена с помощью динамического моделирования, в ходе которого анализировали поведение сминаемого короба.

### **Испытания и моделирование поведения сварных алюминиевых панелей на разрыв**

*Х. Панн (H. Rapp), Институт облегченных конструкций (Institut für Leichtbau, г. Нойбиберг) Университета вооруженных сил (Universität der Bundeswehr, г. Мюнхен, оба — Германия)*

При изготовлении высокоскоростных поездов используются крупногабаритные экструдированные панели из алюминиевых сплавов. Для соединения панелей друг с другом применяется сварка. Сварные швы представляют собой слабые места в конструкции подвижного состава, поскольку являются потенциальными местами зарождения трещин. Это стало очевидным, например, во время катастрофы в Эшеде (Германия) 3 июня 1998 г. Поэтому важно прогнозировать, когда может возникнуть разрушение материала. Для формулирования вязкого разрушения был использован критерий разрыва WIERBICKI и ВАО, который был оценен при решении задач разного масштаба. Экспериментальные исследования были завершены расчетами моделей по методу конечных элементов. Результаты исследований показали, что при прогнозировании разрушений важно

учитывать зоны, подверженные нагреву (находящиеся рядом со сварными стыками). Далее было необходимо объединить трехмерное напряженно-деформированное состояние с критерием разрыва, помимо эквивалентных упругих напряжений. В конечном итоге показана возможность прогнозирования повреждений сварных тонкостенных конструкций путем экспериментальных и численных исследований.

### **Анализ продольного смещения поезда и схода с рельсов на трехмерной модели динамики столкновений по методу конечных элементов**

*Р. Мейвилл (R. Mayville), R. A. Mayville & Associates (г. Ньютон, США)*

При проектировании единиц железнодорожного подвижного состава, в конструкцию которых включены элементы управления распределением и поглощением энергии соударения (СЕМ), необходимо определить различные сценарии столкновений, составленные путем анализа риска возникновения инцидентов. Идеализированные сценарии необязательно представляют действительные условия столкновений. Даже в случаях, когда сталкиваются друг с другом одинаковые единицы подвижного состава, возможны разные варианты взаиморасположения их продольных и поперечных осей относительно друг друга; кроме того, столкновение может произойти в кривой или на стрелочном переводе, когда имеет место естественный угол между продольными осями смежных единиц. К тому же узлы и детали единиц подвижного состава могут иметь отклонения по размерам и прочности. В большей части немногих серьезных столкновений со средствами автомобильного транспорта также обычно присутствуют факторы боковой нагрузки и последующего схода подвижного состава с рельсов.

Для оценки влияния всех этих факторов используют компьютер-

ное моделирование. Результаты исследований показывают, что включение влияния поперечного изгиба в сценарии линейного столкновения не оказывает существенного воздействия на прогнозирование последствий соударения для единиц подвижного состава, оснащенных СЕМ. Использование СЕМ, по всей видимости, существенно снижает также величину бокового смещения при лобовом столкновении по сравнению с обычными конструкциями, в том числе при столкновении в кривой. Видно, что СЕМ обеспечивают улучшение противоударных характеристик единиц подвижного состава или, по крайней мере, не ухудшают их при различных сценариях столкновений, в которых возможны боковые смещения.

### **Сравнение результатов натуральных испытаний и численного моделирования устройств против наползания**

*П. Хусс (P. Huss), Alstom Transport (г. Решоффен, Франция)*

Конструкции, спроектированные для поглощения энергии соударения при столкновениях, должны в определенных условиях исключать возможность вертикальных взаимных смещений единиц подвижного состава относительно друг друга. Если эти устройства не могут выполнять свои функции, имеет место наползание. Причиной вертикальных перемещений могут стать два явления: или продольные силы, возникающие при соударении, слишком высоки по сравнению с инерционной массой вагонов, или поглощающие энергию элементы, срабатывая при столкновении, сами создают вертикальные перемещения. Последнее явление исследовано компанией Alstom Transport методами численного моделирования и динамических испытаний.

На основании этих исследований был сделан вывод, что явление наползания невозможно изучить при моделировании удара в плоскую стену; следует также моделировать вто-

рого участника столкновения. Между первоначальным сдвигом и вертикальным смещением во время соударения нет прямой зависимости. Действующие технические условия относительно вертикальной нагрузки не гарантируют хорошее поведение при столкновении. Поведение единиц подвижного состава во время столкновения не связано напрямую с первоначальной жесткостью, оно в значительной степени зависит от того, как «складывается» деформируемый поглощающий элемент конструкции.

Результаты численного моделирования оказались близки к экспериментальным данным. Сочетание конструкции деформируемых элементов и устройств против наползания должно обеспечивать полное выполнение требования о том, чтобы деформируемые элементы не увеличивали склонность к наползанию.

### **Противоударная платформа локомотивов семейства TRAXX**

*Ф. Карл (F. Carl), Bombardier Transportation (г. Кассель); С. Шнайдер (S. Schneider), EST Eisenbahn-Systemtechnik (г. Альгау); В. Вольтер (W. Wolter), железные дороги Германии (DBAG, г. Бранденбург-Кирхмезер, все — Германия)*

На основе результатов европейского проекта SAFETRAIN железные дороги Германии (DBAG) определили основные требования к пассивной безопасности и сценарии столкновений. Совместно с Bombardier Transportation была разработана новая концепция сопротивляемости локомотивов разрушению при столкновениях, в соответствии с которой в существующие конструкции нужно включать дополнительные поглощающие энергию элементы, но без увеличения массы и длины локомотивов. При этом общая стоимость измененной конструкции не должна быть выше первоначальной.

Компания Bombardier разработала модульную конструкцию кузова согласно концепции много-

этапной деформации. Средняя часть кузова во всех сценариях столкновений остается недеформируемой. Ремонтпригодные поверхности, по которым происходит стыкование деформируемых элементов, обеспечивают простоту замены последних и повышают степень эксплуатационной готовности локомотива. Результаты моделирования по методу конечных элементов показали, что новая конструктивная концепция дает возможность противостоять столкновениям с различного рода препятствиями, в том числе новым деформируемым препятствиям согласно стандартам TSI — HI (первая редакция).

Результаты ударных испытаний реального экипажа в Центре ремонта подвижного состава в Жмигруде (Польша) показали хорошее соответствие результатам численных расчетов. Кузова локомотивов семейства TRAXX стали образцом обеспечения удовлетворительных противоударных свойств подвижного состава.

#### **Поведение квадратных труб при разрушении под воздействием несимметричных нагрузок**

*А. Ло-Конте (A. Lo Conte), Миланский политехнический институт (Politecnico di Milano, г. Милан, Италия)*

Побудительной причиной для проведения исследований на указанную тему был тот факт, что осевой изгиб металлических труб является отличным механизмом поглощения энергии. Однако энергопоглощающий конструктивный элемент во время реального соударения редко подвергается только осевой или только изгибной нагрузке. В качестве примера было произведено исследование поведения тонкостенного стального профиля квадратного сечения при соударении под воздействием кососимметричной нагрузки, т. е. как изгибающего момента, так и продольной силы. При этом возник

ает проблема, заключающаяся в том, что, если профиль полностью разрушается, поглощаемая энергия меньше, чем при осевом разрушении.

Было проведено моделирование по методу конечных элементов и выполнен анализ поведения профилей указанного типа, которые надвигали на жесткую стену с начальной кинетической энергией 1 МДж при длине смятия 350 мм. Варьировались такие параметры, как толщина стенок квадратной трубы (6, 8 и 10 мм), угол (2, 4, 8 и 12 град) и скорость соударения (10, 30, 40, 50 и 60 км/ч). Оказалось, что пиковые нагрузки возрастают при увеличении скорости и толщины стенок профиля и снижаются при увеличении угла соударения. Поглощение энергии существенно уменьшается, когда начинается полный изгиб вместо постепенного бокового выпучивания, причем это уменьшение продолжается по мере увеличения угла воздействия нагрузки.

#### **Композиционные материалы и требования противопожарной безопасности**

*К. Скиббе (K. Skibbe), ВУК-Chemie (г. Везель, Германия)*

Компания ВУК-Chemie разработала соответствующий современным требованиям противопожарной защиты композиционный материал марки SMC (Sheet Moulding Compound). Листы материала изготавливаются методом компрессионного формования из смеси стеклопластика с наполнителем (смолой).

При возгораниях в поездах имеют место три основных вида опасности: выделение тепла, распространение пламени и дыма, повреждение конструкций в результате теплового воздействия. Преимущества SMC в этих аспектах очевидны: материал сопротивляется возгоранию и горению, не расплавляется и не образует капель, не теряет структурную це-

лостность и не выделяет токсичных газов. Кроме того, поставщики SMC могут выполнять требования отдельных заказчиков — изделия из этого материала можно изготавливать с учетом их пожеланий в соответствии со всеми современными требованиями и противопожарными стандартами, такими, например, как новый европейский стандарт EN 45545.

#### **Оценка поведения промежуточных конструкций электропоездов при соударениях**

*Я. Удзума (Y. Ujita), Технико-исследовательский институт железнодорожного транспорта (Railway Technical Research Institute, Токио, Япония)*

Причиной исследования был инцидент в Японии, когда сошедший с рельсов электропоезд столкнулся с другим поездом. В результате столкновения угловые зоны торцов промежуточных вагонов обоих поездов получили сильные повреждения. В этом инциденте 5 чел. погибли и 63 получили ранения.

В данном исследовании рассматривались именно эти зоны вагонов. Основным параметром, определяющим характер силового взаимодействия, была признана разница высот между вагонами бьющим и принимающим удар. Для анализа поведения при соударении были взяты образцы из облегченной нержавеющей стали (SUS), т. е. из материала, использованного при изготовлении угловых зон вагонов, которые подвергли испытаниям на ударном стенде. При скорости соударения 6,9 м/с вертикальные смещения оценивали для разницы высот 150, 165 и 115 мм. Расчеты модели по методу конечных элементов показали результаты, идентичные полученным при испытаниях. Численная модель использована также для оценки деформаций кузова вагона в условиях реального столкновения. На основании результатов расчетов и испытаний был сде-

лан вывод, что концевые и боковые конструкции вагонов должны быть усилены во избежание их напоздания друг на друга, а также деформаций сдвига и разрывов наружных листов обшивки и повреждения угловых стоек с целью повышения противоударной прочности электропоездов.

### Уровни безопасности при столкновениях для внутреннего оснащения пассажирских вагонов

*Дж. Робертс (J. Roberts), Bombardier Transportation (г. Дерби, Великобритания)*

При столкновениях пассажирских вагонов выделяют два основных типа воздействий, которые приводят к травматизму и ранениям пассажиров.

Воздействия первого типа связаны с возникновением высоких продольных отрицательных ускорений, в результате которых пассажиры ударяются о находящиеся впереди элементы оборудования вагонов. Тяжесть последствий соударения зависит от конструкции объектов оснащения интерьера, противоударных характеристик данного пассажирского вагона и скорости столкновения поезда с препятствием. Серьезность соударения для пассажира во многом зависит от конструкции кресла и положения человека перед ударом. В принципе, воздействия данного типа можно отчасти компенсировать в процессе проектирования внутреннего оборудования вагонов, соответствующим образом задавая его характеристики.

Воздействия второго типа имеют место в случае схода вагона с рельсов, опрокидывания или переворота. Скорость соударений с элементами внутреннего оснащения вагона при этом невысокая, но сами соударения происходят в хаотическом порядке, и из-за непредсказуемого направления ударов проектировать интерьер в

этом случае намного труднее. Кроме того, поезда различных категорий требуют разного уровня безопасности.

Концепция заключается в выборе уровня защиты пассажиров. Базовым для всех пассажирских вагонов является фундаментальный уровень защиты (FLP). Дополнительные требования, обусловленные условиями эксплуатации и конструктивной противоударной стойкостью подвижного состава, учитываются в повышенном уровне защиты (ELP). Критерием для определения уровня защиты является скорость соударения, воздействующего на пассажира. Величина ударного воздействия для обеих уровней защиты определяется исходя из максимально допустимого ускорения 5 g и характера распределения сил, оговоренного в действующих требованиях HS-TSI. Соответствующие технические условия подготовлены для всех основных объектов внутреннего оборудования вагонов (кресел, столов, перегородок и поручней).

### Заключение

На симпозиуме, помимо докладов, связанных с аспектами пассивной безопасности, прозвучали предложения по улучшению экономической ситуации на железных дорогах за счет привлечения новых пассажиров и объемов грузовых перевозок при сокращении текущих расходов путем соблюдения следующих принципов. Во-первых, все пассажиры и грузовладельцы должны платить за поездку и перевозку в зависимости от расстояния, и чем меньше продолжительность поездки/перевозки, тем привлекательнее для пользователя железные дороги. Во-вторых, заработная плата персонала должна зависеть от фактических затрат времени, расходы на подвижной состав и инфраструктуру также следует рассчитывать

по временному фактору. Повышение скорости движения поездов и их эксплуатационной надежности улучшает экономическую ситуацию: меньшей численностью персонала, меньшими числом поездов и парком подвижного состава при меньшей нагрузке на инфраструктуру можно перевозить больше пассажиров и грузов. В то же время более высокая скорость движения поездов увеличивает риск возникновения инцидентов и тяжесть их последствий, но продуманным сочетанием мер активной и пассивной безопасности можно снижать соответствующие риски до уровня ниже достигнутого в настоящее время. С этой точки зрения мероприятия по повышению безопасности следует рассматривать как направленные на сокращение расходов в целом и повышение экономической эффективности железнодорожного транспорта.

Эти предложения обобщены в следующем виде:

- переход на график движения поездов с более высокой скоростью и с меньшими межпоездными интервалами;
- снижение расходов на обеспечение активной безопасности за счет перехода на европейскую систему управления движением поездов ETCS, которая, как полагают, будет более экономичной, чем предшествующие ей национальные системы;
- улучшение пассивной безопасности за счет модернизации старых пассажирских вагонов и проектирования новых вагонов с повышенными противоударными свойствами их конструкций. В качестве базового при этом рассматривается европейский стандарт EN 50126 (RAMS: Reliability, Availability, Maintainability and Safety, т. е. надежность, доступность, ремонтпригодность и безопасность).

*ZEVrail Glasers Annalen*, 2005, № 6 — 7, р. 276 — 280.