

На правах рукописи



БОНДАРЕНКО ОЛЬГА ИГОРЕВНА

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ
БЕЗОПАСНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ
ПРИ ОПРОКИДЫВАНИИ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Брянск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Антипин Дмитрий Яковлевич

Официальные оппоненты: **Лапшин Василий Федорович**,
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Уральский государственный
университет путей сообщения», кафедра
«Вагоны», профессор
Козлов Михаил Петрович,
кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Российский университет
транспорта», кафедра «Вагоны и вагонное
хозяйство», доцент

Ведущая организация: Акционерное общество Научная организация
«Тверской институт вагоностроения»

Защита состоится 16 декабря 2021 г., в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.miit.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение эффективной перевозки пассажиров железнодорожным транспортом напрямую связано с высокой концентрацией пассажиропотока, а, следовательно, уплотненным графиком движения поездов. Это приводит к дополнительным нагрузкам на железнодорожные пути, полотно под ними и несущие конструкции вагонов и локомотивов, а также к увеличению износа подвижного состава, что влечет за собой возрастание рисков угрозы безопасности жизни и здоровья пассажиров и членов поездных бригад. Перечисленные факторы учитываются при проектировании и эксплуатации подвижного состава, поэтому вновь разрабатываемый подвижной состав соответствует требованиям безопасности железнодорожных перевозок. Однако, количество происшествий на железнодорожном транспорте с каждым годом растет.

Аварийные ситуации со сходом подвижного состава с рельс, сопровождаемые опрокидыванием вагонов, приводят к травмированию и гибели пассажиров. Избежать травм и увечий в подобных аварийных ситуациях достаточно сложно. Это связано с конструктивными особенностями вагонов, принципами размещения в них пассажирских мест, неготовности пассажиров к аварийным ситуациям и другими факторами.

Согласно Федеральному закону и техническому регламенту современный подвижной состав железных дорог должен соответствовать мировым требованиям безопасности. В соответствии со Стратегией развития железнодорожного транспорта в РФ проблематика повышения безопасности пассажирских перевозок подвижным составом с каждым годом является более актуальной.

Степень разработанности темы.

Исследования в области безопасности железнодорожного транспорта неразрывно связано с динамикой подвижного состава. Значительный вклад в освещение вопросов динамики и безопасности подвижного состава внесли отечественные ученые ведущих научных школ: Антипин Д.Я., Бачурин Н.С., Беляев В.И., Блохин Е.П., Бороненко Ю.П., Буйносов А.П., Бурчак Г.П., Вершинский С.В., Волков И.В., Дубинский С.И., Кеглин Б.Г., Кобищанов В.В., Коршунов С.Д., Котуранов В.Н., Кочнов А.Д., Лазарян В.А., Лапшин В.Ф., Мямлин С.В., Никольский Л.Н., Оганьян Э.С., Орлова А.М., Павлюков А.Э., Петров Г.И., Погорелов Д.Ю., Рабинович Б.А., Ромен Ю.С., Савоськин А.Н., Самошкин С.Л., Серпик И.Н. Скачков А.Н., Смолянинов А.В., Ступин Д.Л.,

Третьяков А.В., Филиппов В.Н., Хохлов А.А., Хусидов В.Д., Черкашин Ю.М., Юхневский А.А. и др.

Прогнозированием прочности конструкции подвижного состава занимались ученые Беспалько С.В., Битюцкий А.А., Бубнов В.М., Ивашова Т.В., Овечников М.Н. и др.

Безопасностью при опрокидывании пассажирских транспортных средств занимались отечественные и зарубежные ученые Багичев С.А., Вашурин А.С., Орлов Н.М., Тумасов Е.В., Belingardi G., Belsare V., Bozdog S.E., Chawla A., Gursel K.T., Iozsa M.D., Kulkarni M., Le G.-N., Liang C.-C., Linstromberg M., Lund Yv., Micu D.A., Mohan D., Pankaj S.D., Pathak Ch., Pawar S.R., Prochowski L., Scholpp G., Sunbuloglu E., Zielonka K. и др.

Цель и задачи. Цель работы заключается в разработке и научном обосновании технических решений, направленных на повышение безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1 Создание методики определения безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании.

2 Разработка и верификация компьютерной модели опрокидывания пассажирского вагона.

3 Оценка динамической нагруженности кузова пассажирского вагона при опрокидывании.

4 Разработка и верификация компьютерной модели антропометрического манекена для определения степени травмирования пассажиров при опрокидывании вагона.

5 Определение конструктивных особенностей подвижного состава, влияющих на степень травмирования пассажиров железнодорожного транспорта.

6 Разработка технических решений, снижающих вероятность и тяжесть травмирования пассажиров в аварийных ситуациях, в виде системы, ограничивающей перемещение ручной клади при опрокидывании вагона, и элементов с пониженной жесткостью, располагающихся на боковых стенах и кромке стола купе вагона.

7 Оценка эффективности разработанных технических решений, направленных на повышение безопасности пассажирских вагонов.

Объектом исследования в работе является пассажирский вагон и его безопасность для пассажиров при опрокидывании.

Предметом исследования является повышение безопасности интерьера пассажирского вагона на основе разработанных технических решений.

Научная новизна.

1 Разработана методика анализа безопасности несущих конструкций пассажирских вагонов в условиях аварийных ситуаций, сопровождающихся опрокидыванием кузова вагона.

2 Выполнен анализ влияния конструктивных особенностей интерьера пассажирского салона на степень травмирования пассажиров в аварийных ситуациях с опрокидыванием вагона.

3 Разработаны твердотельные и конечноэлементные модели пассажирского вагона, исследовано напряженно-деформируемое состояние кузова вагона при опрокидывании.

4 Разработаны аварийные сценарии и компьютерные модели опрокидывания пассажирского вагона.

5 Разработана модель антропометрического манекена для исследования степени травмирования пассажиров железнодорожного транспорта в условиях опрокидывания вагона.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1 Предложенная методика определения безопасности пассажирских вагонов при аварийных ситуациях, связанных с опрокидыванием вагонов, может быть использована для улучшения механических свойств железнодорожного пассажирского подвижного состава на этапе проектирования.

2 Компьютерная модель опрокидывания пассажирского вагона дает возможность проводить приближенную оценку степени травмирования пассажиров, в том числе, с учетом влияния расположения пассажира в купе при опрокидывании вагона.

3 Разработанные модели опрокидывания пассажирского вагона могут быть использованы для доработки существующих и разработки новых межгосударственных стандартов.

Методология и методы исследования.

В теоретических исследованиях по определению динамической нагруженности конструкций вагонов при опрокидывании использованы методы твердотельного и конечноэлементного компьютерного моделирования. Для анализа прочности несущей конструкции кузова пассажирского вагона при действии статических и динамических нагрузок использован программный комплекс конечноэлементного анализа решения нелинейных задач механики

деформируемого тела. Для оценки степени травмирования пассажиров применены антропометрические комплексы.

Положения, выносимые на защиту.

1. Методика определения безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании.

2. Результаты оценки динамической нагруженности кузовов пассажирских вагонов при опрокидывании вагона.

3. Математическая модель опрокидывания кузова пассажирского вагона.

4. Анализ уровней возможного травмирования пассажиров при опрокидывании вагона.

5. Технические решения, направленные на повышение безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании.

6. Результаты теоретических исследований по обоснованию технических решений повышения безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов работы подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов расчетов с данными натурных статических, динамических и поездных испытаний, проведенных АО НО «Тверской институт вагоностроения» (АО НО «ТИВ»), а также с динамическими испытаниями антропометрических манекенов, проведенных Федеральным управлением железных дорог США.

Основные результаты исследования докладывались на научно-технических и научно-практических конференциях. Наиболее значимые результаты диссертации докладывались на конференциях международного и всероссийского уровня: на всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых «Молодежь и наука: шаг к успеху» (ЮЗГУ, 2017 г.), 60-ой всероссийской научной конференции МФТИ (МФТИ, 2017 г.), XXIX международной конференции МИКМУС (ИМАШ РАН, 2018 г.), международной научно-практической конференций-конкурсе «Новые горизонты» (БГТУ, 2018, 2019, 2020 г.), II международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике» (БГТУ, 2018, 2019 гг.), научно-техническом семинаре молодых ученых УНИТ «Современные методы исследования динамики и прочности подвижного состава» (БГТУ, 2018 г.), VIII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2019» (ГПС МЧС, 2019 г.), всероссийской научно-технической конференции «Транспорт Урала» (УрГУПС, 2019,

2020 г.), всероссийской научной конференции «Проблемы и перспективы развития России: молодежный взгляд в будущее» (ЮЗГУ, 2020 г.), X международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (БелГУТ, 2020 г.).

По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе три работы опубликованы в журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованный ВАК России для публикации научных результатов диссертаций, и три работы опубликованы в журналах, входящих в международную базу цитирования Scopus.

Результаты диссертационной работы использовались при проведении научно-исследовательских работ в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-2881.2018.8, и в рамках программы поддержки коммерчески ориентированных научно-технических проектов молодых исследователей «УМНИК».

Получены патенты на полезные модели: № 193195 «Устройство для счета пассажиров», № 191688 «Кузов двухэтажного пассажирского вагона с местами для сидения с аварийными выходами».

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, состоящего из 165 наименований. Общий объем диссертации составляет 176 страниц машинописного текста, содержит 42 рисунка, 10 таблиц и 10 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и степень ее разработанности, представлена цель и сформулированы задачи исследования, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности полученных результатов и их апробация.

В первом разделе диссертации проведен обзор аварий, связанных с опрокидыванием пассажирского железнодорожного подвижного состава, указаны основные причины возникновения аварий со сходом с рельс подвижного состава и опрокидыванием вагонов. Сформированы основные направления исследований по обеспечению и повышению безопасности пассажирских транспортных средств.

1 Экспериментальные натурные испытания транспортных средств, позволяющие подтверждать или опровергать результаты теоретических расчетов. Недостатком данного направления является необходимость использования специализированного оборудования и испытательных полигонов.

2 Реконструкция и расследование аварийных ситуаций, произошедших на пассажирских транспортных средствах. Главной задачей направления является выявление механизма формирования аварийной ситуации в едином масштабе времени для всех участников аварии. Решение задач направления зависит от объема и качества фактической информации обо всех факторах аварийной ситуации, и от возможностей расчетного моделирования сложных процессов силового взаимодействия транспортных средств с окружающей средой, друг с другом и их движения при аварии.

3 Моделирование аварийных ситуаций, которое можно разделить на:

- натурное моделирование аварийных ситуаций с использованием объектно-ориентированных антропометрических устройств;
- математическое твердотельное и конечноэлементное моделирование;
- моделирование аварийных ситуаций в условиях, приближенных к реальным, включающих эвакуацию пассажиров из транспортных средств при аварийных ситуациях.

Выполнен обзор отечественных и зарубежных исследований в области безопасности пассажирского железнодорожного подвижного состава в аварийных ситуациях.

На основе анализа состояния вопроса и проводимых исследований сформулированы цель и задачи исследования.

Второй раздел посвящен разработке методики определения безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании, которая включает пять основных этапов.

На первом этапе разработанной методики определяются условия аварийного опрокидывания. Для этого разрабатывается трехмерная детализированная модель кузова пассажирского вагона. Определяется кинематика схода вагона с рельс и опрокидывания. Вычисляются скорости и ускорения вагона при опрокидывании.

На втором этапе методики формируются модели опрокидывания пассажирского вагона. Для этого разрабатываются подсистемы «тележка» и «автосцепное устройство». Определяются контактные связи между

подсистемами и, разработанной на первом этапе методики, моделью кузова вагона. Для создания поверхности для опрокидывания вагона разрабатывается модель «насыпь» в соответствии с нормативной документацией. Задаются начальные и граничные условия движения и опрокидывания пассажирского вагона. В результате моделирования движения вагона проводится оценка динамической нагруженности несущей конструкции. Проводится верификация разработанной модели путем сопоставления полученных при моделировании динамических показателей с результатами натурных ходовых испытаний вагона.

На третьем этапе методики определяется напряженно-деформируемое состояние несущей конструкции кузова вагона при опрокидывании. На данном этапе проводится разработка конечноэлементной модели кузова вагона, которая позволяет исследовать влияние характеристик податливости кузова. При этом жесткость кузова определяется по результатам квазистатических расчетов. Модель вагона, состоит из конечных элементов, которые учитывают мембранные, сдвиговые, поперечные и изгибные силовые факторы. Производится расчет несущей конструкции кузова пассажирского вагона по методу конечных элементов, с помощью которого определяются эквивалентные напряжения в конструкции. Конечноэлементная модель кузова вагона верифицируется путем сопоставления результатов с данными натурных стендовых испытаний, проводимых в соответствии с нормативной документацией. Оцениваются упругопластические деформации кузова вагона при опрокидывании и определяются усилия, действующие на вагон в процессе опрокидывания.

Четвертый этап методики определения безопасности пассажирского вагона при опрокидывании включает разработку модели антропометрического манекена по геометрическим и инерционным данным натурального образца. С помощью разработанной модели определяется механика поведения манекена при опрокидывании вагона. Проводится верификация разработанной модели манекена. Определяются контактные взаимодействия между моделью антропометрического манекена, элементами купе вагона и моделями ручной кладки, расположенной на багажных полках купе. Антропометрическая модель манекена включается в разработанную модель пассажирского вагона и проводится моделирование аварийного опрокидывания. По полученным данным о контактных взаимодействиях модели манекена с элементами

интерьера купе и ручной кладью рассчитываются универсальные критерии травмирования для отдельных элементов модели манекена.

На завершающем этапе проводится анализ результатов и делается заключение о безопасности пассажирского вагона.

Для апробации методики разработана пространственная детализированная твердотельная модель пассажирского вагона модели 61-4440 производства ОАО «Тверской вагоностроительный завод» с реальными весовыми и геометрическими характеристиками, которая включает в себя подсистемы «тележка» и «автосцепка».

Разработанная модель пассажирского вагона верифицирована путем сопоставления получаемых результатов с ходовыми динамическими испытаниями на прямом и криволинейном участке пути в диапазоне скоростей 40-160 км/ч. Сопоставлялись горизонтальные и вертикальные ускорения кузова вагона полученные в ходе моделирования движения вагона с результатами испытаний. Расхождение результатов составило не более 19 %.

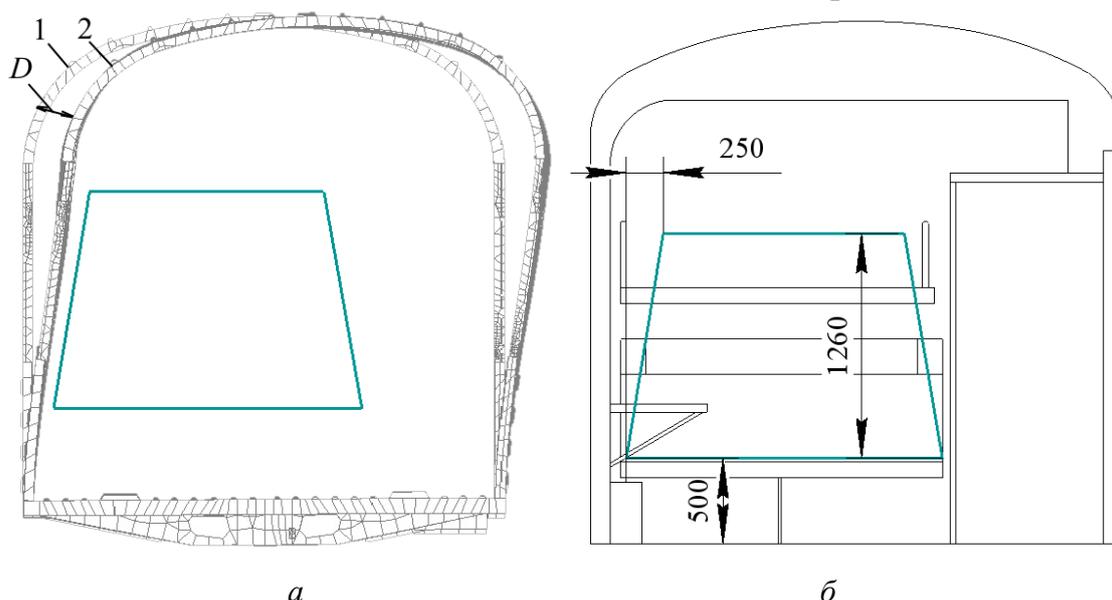
На основе трехмерной модели пассажирского вагона разработана пластинчатая конечноэлементная модель кузова, имеющая 146 тыс. конечных элементов, объединенных в 137 тыс. узлах, общее число степеней свободы расчетной схемы составило 816 тыс.

В качестве материала конечным элементам, описывающим металлоконструкцию кузова вагона, присвоена модель материала, которая описывает связь между динамическими напряжениями и скоростью деформирования изотропного материала. Верификация модели материала показала достаточную сходимость с результатами экспериментов на растяжение стального образца.

Для верификации конечноэлементной модели кузова вагона сопоставляются результаты компьютерного моделирования с результатами статических натурных стендовых испытаний, проводимых АО НО «Тверской институт вагоностроения». Сопоставление значений проводилось по значениям нормальных напряжений в поперечном сечении кузова по ближнему к среднему сечению кузова оконному проему. Расхождение результатов не превысило 18 %.

Проведена оценка напряженно-деформируемого состояния кузова вагона при опрокидывании на плоскую горизонтальную поверхность. Выявлено, что при опрокидывании вагона на поверхность опрокидывания не нарушается

объем остаточного пространства (рисунок 1) для пассажиров, размеры которого рассчитаны в соответствии с Правилами ЕЭК ООН № 66. Максимальные напряжения в элементах кузова при опрокидывании не превысили 310 МПа.



а – деформируемое состояние кузова вагона после опрокидывания: 1 – кузов без деформации, 2 – кузов в деформируемом состоянии после опрокидывания, D – максимальная деформация при опрокидывании кузова; б – размеры остаточного пространства в салоне вагона

Рисунок 1 – Остаточное пространство кузова вагона

На основе анализа произошедших аварий на железнодорожном транспорте сформировано шесть основных сценариев опрокидывания пассажирского вагона.

1 Одиночно стоящий пассажирский вагон опрокидывается на плоскую поверхность, описывающую верхнее строение пути без возвышения, с малой скоростью движения вагона.

2 Одиночный вагон опрокидывается на плоскую поверхность с учетом скорости движения в момент опрокидывания.

3 Одиночный вагон опрокидывается на наклонную поверхность, описывающую насыпь железнодорожного полотна в соответствии со Сводом правил «Железнодорожный путь» с малой скоростью движения вагона в момент опрокидывания.

4 Одиночный вагон опрокидывается на наклонную поверхность, описывающую насыпь железнодорожного полотна с учетом скорости движения вагона в момент опрокидывания.

5 Сцеп из трех пассажирских вагонов опрокидывается на плоскую поверхность с учетом скорости движения состава в момент опрокидывания.

б Сцеп из трех пассажирских вагонов опрокидывается на наклонную поверхность, описывающую насыпь железнодорожного полотна с учетом скорости движения состава в момент опрокидывания.

Моделирование движения вагона выполняется посредством модуля программного комплекса *UM Simulation*, в котором осуществляется интегрирование полученных уравнений движения.

Движение одиночного вагона и сцепа вагонов моделируется при помощи специальных сил, описывающих тяговое усилие, которое прикладывалось к автосцепному устройству первого вагона в сцепе.

Для оценки возможной степени травмирования пассажиров при опрокидывании вагона разработана трехмерная модель антропометрического манекена *Hybrid III 50th Percentile Male*, имеющая весовые и геометрические характеристики подобно натурному манекену. Модель манекена представлена совокупностью абсолютно твердых тел, связь между которыми задана шарнирными соединениями, описывающими суставы человеческого тела. В модель манекена введены ограничения поворота составных элементов и учтена возможность контактного взаимодействия частей манекена между собой при их взаимном перемещении. Для учета деформации шейного отдела позвоночника и грудной части в модель манекена включены реологические модели, описывающие вязкоупругие свойства биологических сред.

Для возможности сгибания-разгибания элементов бедер относительно таза манекена в разрабатываемую математическую модель внесено изменение геометрических характеристик тазового отдела. Схема модели манекена представлена на рисунке 2.

Разработанная модель манекена верифицирована путем сопоставления результатов, полученных с помощью компьютерного моделирования и натурных экспериментов, проводимых в соответствии с требованиями Федерального управления железных дорог США. Сравнение проведено по значениям критериев травмирования. Расхождение результатов составило не более 22,7 %.

Для проведения моделирования аварийного опрокидывания пассажирского вагона его модель дополнена детализированными твердотельными моделями купе, в точности описывающими интерьер салона вагона и моделями ручной клади, размеры которой принимались с максимальными размерами, указанными в Правилах пассажирских перевозок. В модель купе включена модель антропометрического манекена. Между

моделями заданы соответствующие специализированные контактные элементы программного комплекса моделирования динамики систем тел типа «точка-плоскость».

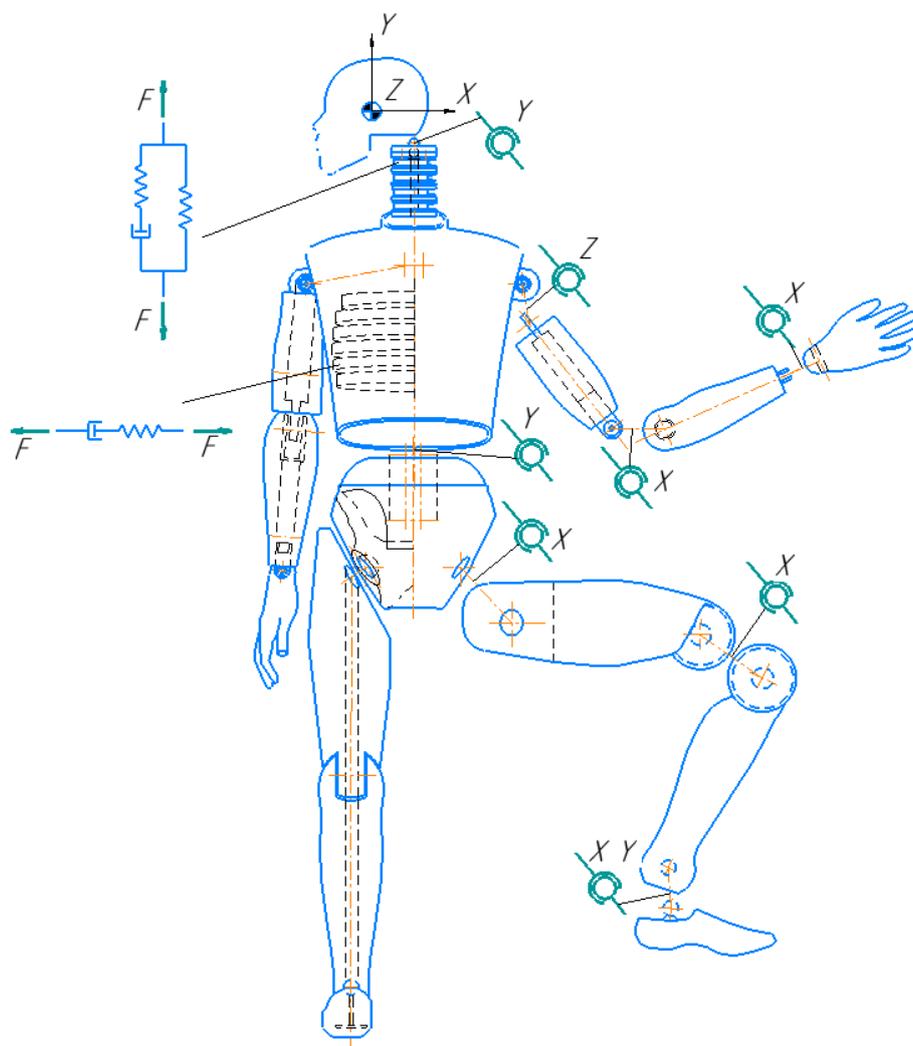


Рисунок 2 – Схема механической модели антропометрического манекена

В третьем разделе выполнено исследование безопасности пассажиров при опрокидывании вагона на две боковые стороны вагона. Для этого в соответствии с разработанными сценариями аварийного опрокидывания проведено моделирование схода с рельс и опрокидывание пассажирского вагона. Модели манекена задавалось возможное положение пассажира в купе вагона (рисунок 3). Общее количество проведенных экспериментов, с учетом опрокидывания вагона на обе боковые стороны, по разработанным сценариям составило 144.

Определена кинематика движения модели манекена в салоне вагона при опрокидывании. Выявлены зоны контактного взаимодействия между разработанными моделями. Получены зависимости динамических воздействий

на модель манекена от времени моделирования опрокидывания: ускорения головы модели манекена, силы и моменты действующие на шейный отдел, силы, действующие на бедренные элементы, и деформация грудного отдела модели манекена. По полученным зависимостям рассчитаны универсальные критерии травмирования.

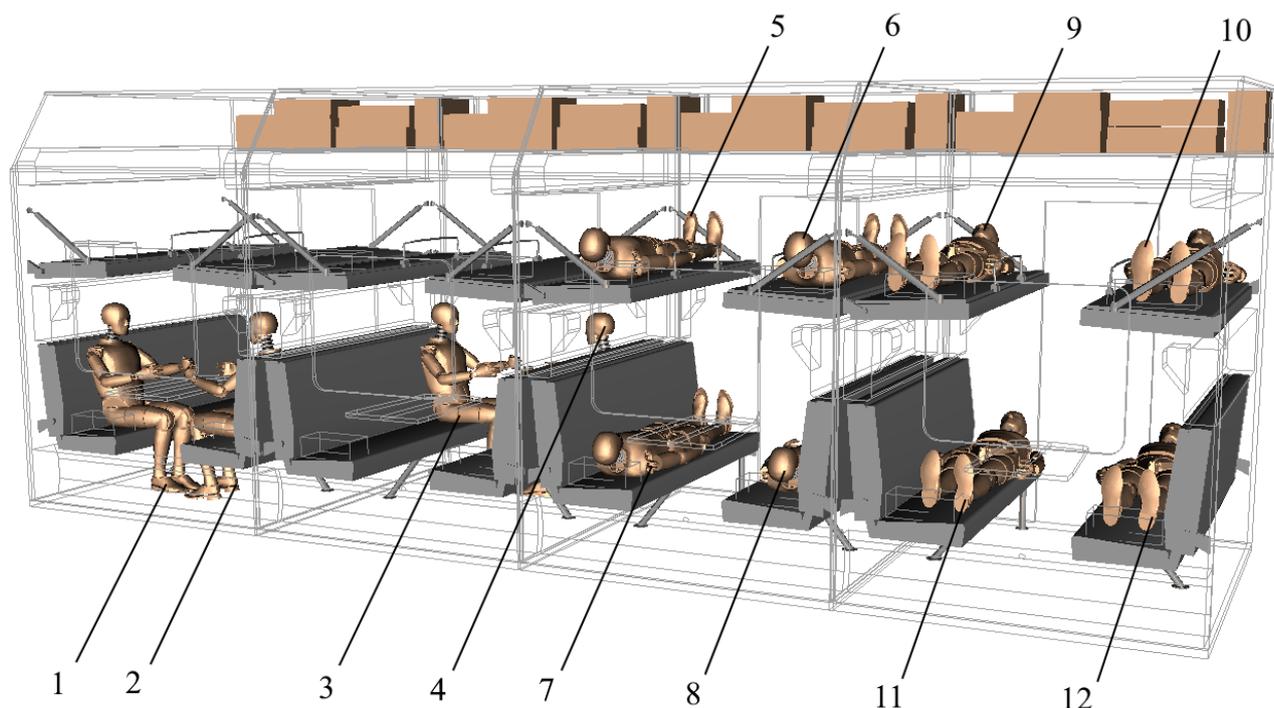


Рисунок 3 – Положения модели антропометрического манекена в купе пассажирского вагона

Критерий травмирования головы определяется по формулам (1) и (2):

$$HIC = \max_{t_1, t_2} \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a \cdot dt \right]^{2,5} t_2 - t_1 \right\}, \quad (1)$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}, \quad (2)$$

где a – результирующее ускорение центра тяжести головы в единицах ускорения свободного падения g ; t_1, t_2 – точки на оси времени, ограничивающие длительность действия перегрузки, в пределах которых HIC достигает своего максимума; dt – шаг интегрирования не более $1,25 \cdot 10^{-4}$ с.

Критерий травмирования шейного отдела позвоночника определяется по формуле (3):

$$N_{ij} = \frac{F_z}{F_{кр}} + \frac{M_y}{M_{кр}}, \quad (3)$$

где F_z – осевое сжимающее/растягивающее усилие, приложенное к узлу соединения головы и шеи; $F_{кр}$ – критическое значение осевого усилия, используемое для нормирования; M_y – изгибающий момент при растяжении/сжатии относительно боковой оси, расположенной в узле соединения головы и шеи; $M_{кр}$ – критическое значение изгибающего момента, используемое для нормирования.

Комбинированный критерий травмирования грудного отдела определяется по формуле (4):

$$CTI = \frac{A_{max}}{A_{кр}} + \frac{D_{max}}{D_{кр}}, \quad (4)$$

где A_{max} – максимальное ускорение в течение 3 мс на спинной мозг; $A_{кр}$ – критическое ускорение, используемое для нормирования, равное 85 g в течение 3 мс; D_{max} – максимальная деформация грудной клетки; $D_{кр}$ – деформация, используемая для нормирования равная 102 мм.

В диссертационной работе травмирование грудной клетки определяется как максимальная деформация грудного отдела по времени. Принято обозначение для критерия травмирования грудного отдела манекена – $CTI(d)$.

Критерий травмирования бедра FFC определяется на основе сжимающей нагрузки, выраженной в кН, передаваемой по оси к каждому бедру манекена.

По данным натурных испытаний и исследований определения безопасности транспортных средств определено, что при достижении критерием травмирования головы значения в 1000 единиц вероятность перелома черепных костей составляет 48...50 %. При значении $N_{ij} = 1$ вероятность тяжелых травм шеи составляет 22 %. При деформации грудного отдела в 102 мм вероятность переломов ребер и травм мягких тканей составляет 91 %. При $FFC = 10$ кН вероятность наступления тяжелых травм бедер составляет 35 %.

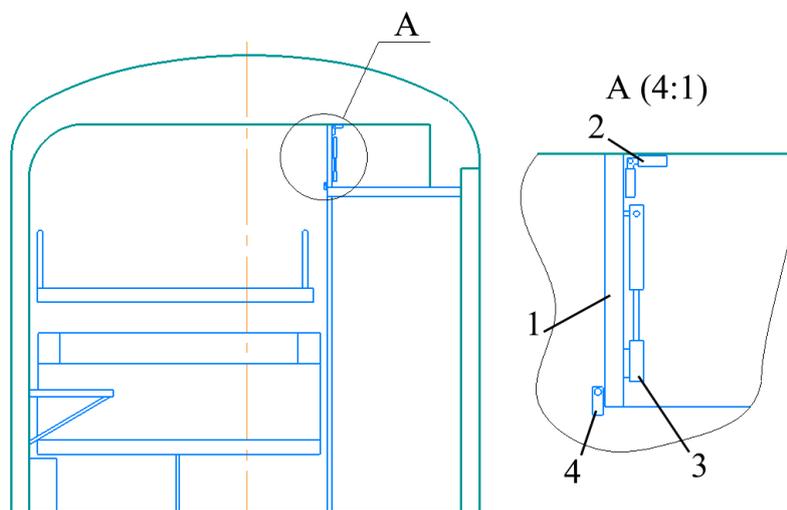
По результатам оценки рассчитанных значений критериев травмирования выявлены элементы интерьера купе, взаимодействие с которыми может привести к серьезным травмам пассажиров при опрокидывании вагона. Травмоопасными зонами купе, для которых наблюдается наиболее частое взаимодействие с манекеном при опрокидывании вагона, являются боковые

стены и кромка стола купе. Выявлено, что пассажиры располагающиеся на верхних полках купе могут получить тяжелые травмы грудного отдела и бедра от падающей на них ручной клади при опрокидывании вагона, которая также может препятствовать эвакуации пассажиров после аварии.

Для снижения степени травмирования пассажиров при опрокидывании вагона необходимо применение дополнительных технических решений. Для исключения травмирования пассажиров от падающей с багажных полок ручной клади предложено включить в купе вагона систему, которая ограничит перемещение багажа при опрокидывании. Для снижения тяжести травм, получаемых пассажирами при контактировании с элементами купе вагона, предлагается в травмоопасные зоны купе внедрить дополнительные элементы с пониженной жесткостью, характеристики которых соответствуют характеристикам подголовников диванов купе.

В четвертом разделе проведено обоснование технических решений повышения безопасности пассажирского вагона при опрокидывании.

Система ограничения перемещения ручной клади (рисунок 4) имеет поворотную дверцу, которая может находиться в фиксированном закрытом и открытом положениях, подъемное устройство, которое одним концом крепится к дверце, а другим – к боковой поверхности отделения для ручной клади, и ручку для удобства эксплуатации.



*1 – дверца, 2 – крепление дверцы к отделению для ручной клади,
3 – подъемное устройство, 4 – ручка*

Рисунок 4 – Система ограничения перемещения ручной клади при опрокидывании вагона

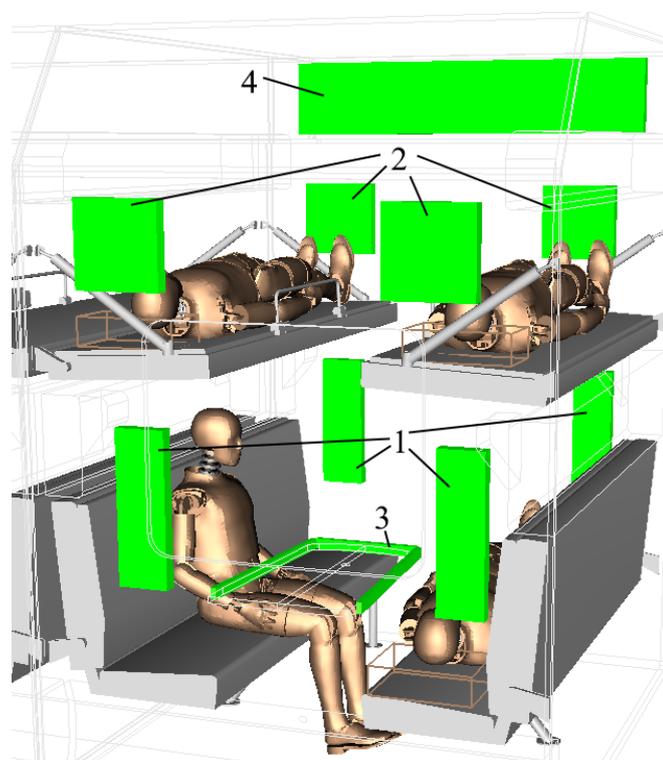
Размеры для дополнительных элементов с пониженной жесткостью определены экспериментальным путем с помощью моделирования

опрокидывания вагона с моделью манекена. В ходе моделирования выявлен набор точек на поверхностях элементов интерьера купе, в которых происходит контакт элементов манекена и интерьера вагона.

Для дополнительных элементов в травмоопасных зонах определены основные размеры: для боковых стен в нижней части – $550 \times 180 \times 50$ мм, для боковых стен в верхней части – $300 \times 300 \times 50$ мм, по кромке стола купе – 40×25 мм. Размещение технических решений в модели купе вагона представлено на рисунке 5.

Выполнен анализ влияния предлагаемых технических решений на массу пассажирского вагона. Система, ограничивающая перемещение ручной клади, имеет массу до 4 кг. Элементы с пониженной жесткостью на боковой стене и кромке стола суммарно имеют массу 6...7 кг. Таким образом, дополнительная масса на вагон от предлагаемых технических решений составит не более 99 кг для одного вагона.

Нормативные документы, направленные на организацию пассажирских перевозок железнодорожным транспортом, не препятствуют использованию предлагаемых в работе технических решений, поскольку последние не вносят значительных эргономических изменений в пассажирское купе вагона, а также не влияют на технические характеристики кузова вагона.



1, 2 – элементы с пониженной жесткостью на боковых стенах купе, 3 – элемент по кромке стола купе, 4 – система ограничения перемещения ручной клади

Рисунок 5 – Размещение технических решений повышения безопасности вагона

Разработанные технические решения, направленные на повышение безопасности пассажирских вагонов, включены в модель купе вагона. Между элементами с пониженной жесткостью и моделью антропометрического манекена заданы стандартные элементы программного комплекса типа «точка-плоскость» с соответствующими характеристиками. Выполнено моделирование опрокидывания вагона по разработанным сценариям с учетом включенных моделей разработанных технических решений.

Получены динамические воздействия на модель манекена (рисунок 6), по которым определены критерии травмирования пассажиров. По результатам полученных значений построены гистограммы зависимостей величин критериев травмирования от рассматриваемых положений манекена в купе вагона.

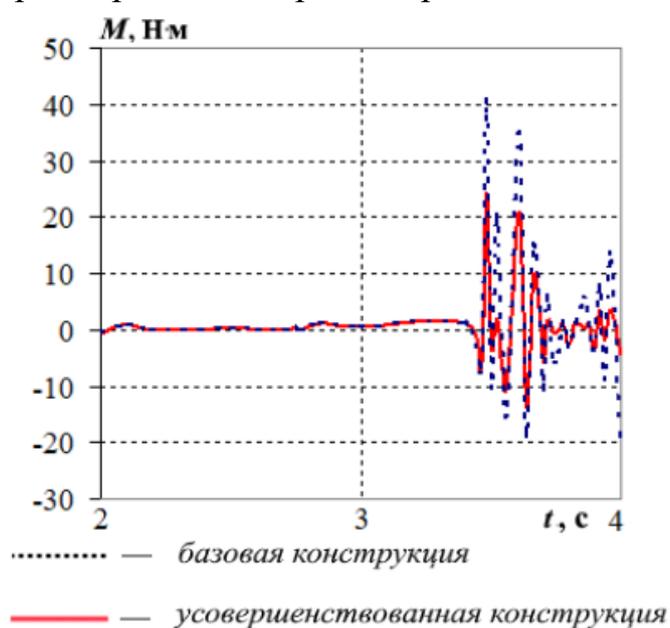


Рисунок 6 – Изгибающий момент, действующий на шейный отдел манекена по времени опрокидывания вагона

Полученные значения сопоставлены со значениями, полученными при моделировании опрокидывания вагона без технических решений (рисунок 7).

В результате моделирования опрокидывания пассажирского вагона с разработанными техническими решениями выявлено снижение значений критериев травмирования.

Максимальное снижение критерия травмирования головы, за счет включения в модель вагона системы ограничения перемещения ручной кладь,

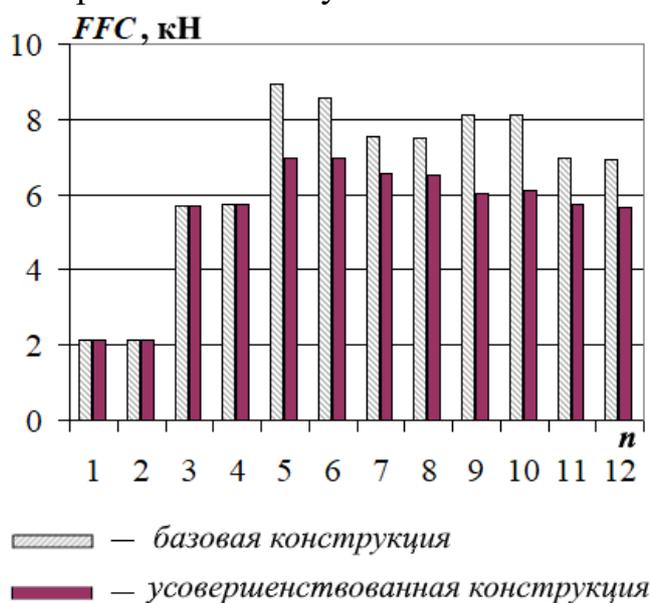
отмечено для манекенов на верхних полках купе. При этом значение критерия снизилось на 40,6 %. Среднее значение снижения критерия *НИС* составляет 36 %, что достигается за счет включения в модель вагона элементов с пониженной жесткостью на боковых стенах купе.

Критерий травмирования шейного отдела позвоночника N_{ij} , при опрокидывании вагона с включенными в интерьер купе техническими решениями уменьшился на 36,1 %.

Анализируя полученные значения деформации грудного отдела, выявлено уменьшение значения на 56,3 % для сценария с опрокидывание сцепы из трех вагонов при средней скорости движения. Уменьшение показателя

достигнуто за счет элементов с пониженной жесткостью на кромке стола купе. Для положений манекена на верхних полках купе наблюдается уменьшение критерия травмирования груди на 38...39 % за счет введения в интерьер купе системы ограничивающей перемещение ручной кладки.

Для критерия травмирования бедра манекена наблюдается уменьшение значения на 31,1 %. Уменьшение FFC отмечено для положений манекена на верхних полках купе.



n – положение манекена

Рисунок 7 – Гистограмма зависимости критерия травмирования бедра манекена от положения в купе вагона при опрокидывании

и кромке стола купе наблюдается для HIC на 35,9 %, для N_{ij} – 36,1 %, для $STI(d)$ – 56,3 %. Для критерия FFC снижение значений, с учетом элементов с пониженной жесткостью на боковых стенах незначительно.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод об уменьшении степени травмирования в 1,5...2 раза. Таким образом, возможную степень травмирования, получаемую пассажирами при опрокидывании вагона, можно описать как легкую и среднюю. При этом возможны травмы пассажиров, связанные с легкими ушибами головы, грудной клетки, а также незначительными травмами шеи. Вероятность получения травм тяжелой степени тяжести и летальных исходов значительно снижается.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об эффективности предлагаемых технических решений, применяемых для повышения безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании.

Анализируя полученные данные определено, что наибольшее снижение значений критериев травмирования наблюдается за счет введения механической системы для ограничения перемещения ручной кладки. При этом процентное снижение значений критериев травмирования составляет для HIC – 40,6 %, для N_{ij} – 25 %, для $STI(d)$ – 43,8 %, для FFC – 31,1 %.

Снижение значений критериев травмирования за счет внедрения элементов с пониженной жесткостью на боковых стенах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Разработана и апробирована методика определения безопасности пассажирского вагона при опрокидывании.

2 Разработана и верифицирована твердотельная и пластинчатая конечноэлементная модель пассажирского вагона, детально описывающая несущую конструкцию кузова вагона.

3 Разработана и верифицирована компьютерная модель антропометрического манекена для определения возможной степени травмирования пассажиров при опрокидывании вагона.

4 Сформировано шесть сценариев опрокидывания пассажирского вагона, включающих опрокидывание одиночного вагона и сцепы из трех вагонов с малыми и средними скоростями движения на плоскую и наклонную поверхности. Установлено, что пластические деформации кузова пассажирского вагона при опрокидывании не влияют на изменение внутреннего пространства салона вагона.

5 Определена кинематика движения модели антропометрического манекена в зависимости от возможного положения пассажира в салоне вагона в рамках сформированных сценариев опрокидывания вагона. Всего рассмотрено 12 положений пассажира в вагоне.

6 Рассчитаны значения универсальных критериев травмирования для головы, шейного отдела позвоночника, грудного отдела и бедра модели антропометрического манекена. Установлено, что пассажиры, находящиеся в купе вагона, могут получать серьезные травмы, приводящие к тяжелым ушибам и переломам костей. Выявлено, что в рамках рассмотренных аварийных сценариев мала вероятность летального исхода для пассажиров.

7 Рекомендовано, для снижения степени травмирования пассажиров, применение технического решения, направленного на ограничение перемещения ручной клади при опрокидывании вагона. Разработаны элементы с пониженной жесткостью, устанавливаемые в определенных экспериментальным методом, травмоопасных зонах для пассажиров. Определены параметры предлагаемых технических решений.

8 Выполнена оценка эффективности предложенных технических решений повышения безопасности и снижения степени травмирования пассажиров железнодорожного транспорта. Установлено, что применение разработанных технических решений позволит снизить уровни травмирования пассажиров при опрокидывании пассажирского вагона.

9 Перспективой дальнейшей разработки темы исследования является развитие методики определения безопасности пассажирских вагонов с учетом оценки эффективности эвакуационных мер при опрокидывании вагона и совершенствование конструкции подвижного состава с целью повышения скорости эвакуации пассажиров, в том числе пассажиров с различной степенью тяжести травмирования при опрокидывании вагона.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях:

1. Антипин, Д.Я. Нагруженность пассажирского поезда при аварийном соударении с автомобилем на железной дороге // Д.Я. Антипин, С.Г. Шорохов, О.И. Бондаренко // Известия Транссиба. – 2018. – №3. – С. 2-10.

2. Антипин, Д.Я. Анализ аварийного соударения пассажирского поезда с препятствием на железнодорожном пути / Д.Я. Антипин, С.Г. Шорохов, О.И. Бондаренко // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 4. – С. 47-54.

3. Бондаренко, О.И. Оценка уровня травмирования пассажиров вагонов в аварийных ситуациях при взаимодействии с багажом / О.И. Бондаренко, Д.Я. Антипин, С.Г. Шорохов // Транспорт Урала. – 2020. – № 1. – С. 30-34.

б) в международных реферативных базах данных Scopus и Web of Science:

4. Antipin, D.Ya. CAD/CAE-technologies application for assessment of passenger safety on railway transport in emergency / D.Ya. Antipin, S.G. Shorokhov, O.I. Bondarenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327. – P. 022007 (1-7).

5. Shorokhov, S.G. Modeling of nonlinear shock deformation of passenger car bodies with emergency exits / S.G. Shorokhov, O.I. Bondarenko, V.A. Lebedev // Journal of Physics: Conference Series International Scientific Conference «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH-2019». Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. – 2019. – Vol.1399(1). – P. 022054 (1-7).

6. Shorokhov, S.G. Prediction of injury to passengers of railway rolling stock based on modern physical simulation methods / S.G. Shorokhov, O.I. Bondarenko, V.V. Kobishanov // Journal of Physics: Conference Series International Scientific Conference «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH-2019». Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of

Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. – 2019. – Vol. 1399. – P. 055098 (1-7).

в) в других изданиях и материалах конференций:

7. Бондаренко, О.И. Методика анализа безопасности конструкции пассажирских вагонов при аварийных соударениях / О.И. Бондаренко, С.Г. Шорохов // Техника и технологии наземного транспорта: материалы Всероссийской конференции аспирантов (25 – 26 января 2018 г., г. Екатеринбург: УрГУПС. – 2018. – С. 13-17.

8. Бондаренко, О.И. Методика моделирования упругопластических деформаций материалов несущей конструкции кузова пассажирского вагона при аварийных соударениях / О.И. Бондаренко, А.М. Высоцкий // Сборник научных трудов 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные инновации в науке и технике» (19-20 апреля 2018 года)/ редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); Юго-Зап. Гос. Ун-т. Курск. – 2018. – С.46-49.

9. Бондаренко, О.И. Методика оценки безопасности пассажирских вагонов в условиях аварийного опрокидывания на откос насыпи железнодорожного полотна / О.И. Бондаренко // Новые горизонты: Материалы V Международной конференции-конкурса, 20 апреля 2018 года, Брянск [Текст] + [Электронный ресурс]/под ред. О.М. Голембиовской. – Брянск: БГТУ. – 2018. – С. 48-50.

10. Бондаренко, О.И. Оценка безопасности пассажирских вагонов при аварийном опрокидывании на бок / О.И. Бондаренко, Д.А. Бондаренко, Д.Я. Антипин // Труды 60-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 20–26 ноября 2017 г. Аэрокосмические технологии. – М.: МФТИ. – 2017. – С.186-188.

11. Бондаренко, О.И. Методика оценки безопасности пассажирских вагонов при аварийном опрокидывании / О.И. Бондаренко // XXIX Международная конференция «Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов» (МИКМУС - 2017): материалы конференции (Москва, 6-8 декабря 2017 года). – М.: Изд-во ИМАШ РАН. – 2018. – С.54-56.

12. Бондаренко, О.И. Методика оценки безопасности пассажирского подвижного состава при аварийном опрокидывании с использованием элементов САПР / О.И. Бондаренко, Д.Я. Антипин // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ. – 2018. – Ч.2. С.6-9.

13. Бондаренко, О. И. Исследование аварийного опрокидывания пассажирских вагонов для оценки безопасности пассажиров / О.И. Бондаренко, Д.А. Бондаренко // Перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей

материалы 8-й Международной научно-практической конференции (24-25 октября 2018 года)/ редкол.: Горохов А.А. (отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. Курск. – 2018. – С. 21- 23.

14. Бондаренко, О.И. Анализ возможного травмирования пассажиров подвижного состава при аварийном опрокидывании кузова вагона на боковую стену / О.И. Бондаренко, С.Г. Шорохов // Новые горизонты: Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию БГТУ, 21 марта 2019 года, Брянск [Электронный ресурс]/под ред. О.М. Голембиовской. – Брянск: БГТУ. – 2019. – С. 8–11.

15. Бондаренко, О.И. Анализ безопасности несущей конструкции кузова пассажирского вагона при аварийном опрокидывании на боковую стену / О.И. Бондаренко, Д.Я. Антипин, С.Г. Шорохов // Материалы VIII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2019». – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2019. – С. 188-193.

16. Антипин, Д.Я. Требования по обеспечению безопасности железнодорожного пассажирского подвижного состава в аварийных ситуациях / Д.Я. Антипин, О.И. Бондаренко, С.Г. Шорохов, Д.А. Бондаренко // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производства», Том 4. Технические и естественные науки. Рост. Гос. ун-т. Путей сообщения. – Ростов н/Д. – 2019. – С. 290-294.

17. Бондаренко, О.И. Оценка травмирования пассажиров вагонов при опрокидывании вагона на бок / О.И. Бондаренко // Новые горизонты: материалы VII научно-практической конференции с международным участием, 20 марта 2020 года, Брянск/под ред. О.М. Голембиовской. – Брянск: БГТУ. – 2020. – С. 23-26.

18. Бондаренко, Д.А. Методика оценки травмирования пассажиров железнодорожного транспорта при аварийных ситуациях / Д.А. Бондаренко, О.И. Бондаренко // Современные инновации в науке и технике: Сборник научных трудов 10-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (15-16 апреля 2020 года)/ редкол.: Разумов М.С. (отв. ред.); ЮгоЗап. гос. ун-т. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – 2020. – С. 51-54.

19. Бондаренко, О.И. Оценка безопасности пассажирского подвижного состава при опрокидывании вагонов / О.И. Бондаренко, Д.А. Бондаренко // Проблемы безопасности на транспорте: материалы X междунар. научн.-практ. конф. (Гомель, 26-27 ноября, 2020 г.) : в 5 ч. Ч. 5 / М-во трансп. И коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж.д., Белорус. гос. ун-т трансп.; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ. – 2020. – С. 16-18.

