



Рязанов Эльдар Михайлович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ АВАРИЙНЫХ КРЭШ-СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация (технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС).

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Павлюков Александр Эдуардович

Официальные оппоненты:

Петров Геннадий Иванович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения императора Николая II», заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство»;

Антипин Дмитрий Яковлевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Подвижной состав железных дорог».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС).

Защита состоится «26» мая 2017 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. Б2-15 – зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат диссертации разослан «04» апреля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тимухина Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы заметно ужесточаются требования по безопасности к железнодорожному подвижному составу. В 2011 году утверждены технические регламенты Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» и «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта». В соответствии с требованиями этих документов утвержден и введен в действие ГОСТ Р 55434-2013 «Электропоезда. Общие технические требования». Согласно стандарту вновь разрабатываемый электропоезд должен быть оснащен системой пассивной безопасности, включающей аварийную крэш-систему – совокупность устройств поглощения энергии в подвижном составе, предназначенных для поглощения кинетической энергии объектов аварийного столкновения за счет необратимой деформации собственных конструкций.

Параметры системы пассивной безопасности на железных дорогах России регламентируются нормативным документом ГОСТ 32410-2013 «Крэш-системы аварийные железнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок. Технические требования и методы контроля». Стандарт предусматривает два способа подтверждения работоспособности крэш-системы: путем проведения натурных испытаний аварийного столкновения подвижного состава с препятствием, либо за счет численного моделирования процессов аварийного столкновения. Натурные испытания требуют высоких затрат, в то же время вопросам расчетной оценки работоспособности аварийных крэш-систем пока уделяется недостаточное внимание, поскольку создание подобных технических средств системы пассивной безопасности представляет собой относительно новое направление для отечественного железнодорожного машиностроения. Таким образом, задачи совершенствования расчетных методов оценки работоспособности аварийных крэш-систем электропоездов являются актуальными.

Объект исследования. Электроподвижной состав, электропоезд «Ласточка».

Область исследования. Оценка динамических и прочностных качеств подвижного состава при аварийном столкновении с препятствием на пути следования, оценка работоспособности аварийной крэш-системы.

Степень разработанности темы. Исследования в области оценки работоспособности аварийных крэш-систем подвижного состава теснейшим образом связаны с вопросами продольной динамики вагонов. Значительный вклад в развитие знаний о продольной динамике вагонов внесли ученые: Н.Е. Жуковский, В.А. Лазарян, Е.П. Блохин, Л.А. Манашкин, С.В. Вершинский, Л.Н. Никольский, Б.Г. Кеглин, А.П. Болдырев, В.В. Кобищанов, В.Д. Хусидов, В.Н. Котуранов, П.А. Устич, В.Н. Филиппов, Г.И. Петров, С.В. Беспалько, А.В. Смольянинов, М.М. Соколов, Ю.П. Бороненко, А.А. Битюцкий, В.Ф. Ушкалов, Г.И. Богомаз и многие другие. Исследованиями аварийных столкновений пассажирского подвижного состава занимались: А.А. Битюцкий, Ю.П. Бороненко, М.В. Зверев, А.М. Орлова, Д.Я. Антипин, В.В. Кобищанов, Д.Ю. Расин, А.А. Азарченков, С.Г. Шорохов, Е.К. Рыбников, Н.М. Журавлев, В.Ф. Ушкалов, Г.И. Богомаз, Н.Е. Науменко, М.Б. Соболевская.

Существующие работы, посвященные моделированию аварийных столкновений пассажирского подвижного состава, в значительной степени опираются на модели вагонных конструкций в виде системы сосредоточенных масс или абсолютно твердых тел, соединенных между собой силовыми связями, что может использоваться только в качестве предварительного выбора основных характеристик устройств поглощения

энергии на этапе проектирования крэш-системы. Наиболее целесообразный подход оценки работоспособности крэш-систем заключается в проведении нелинейного динамического анализа соударяющихся конструкций на основе метода конечных элементов. Однако в отечественных работах, использующих данный подход, принятые расчетные модели требуют развития, в частности они не учитывают влияние ходовых частей на процессы аварийного столкновения, что может негативно отразиться на адекватности результатов расчета и не позволит оценить риск схода тележек с рельсов.

Цель и задачи. Цель настоящей работы заключается в разработке усовершенствованной методики моделирования процессов аварийного столкновения электропоезда для оценки работоспособности крэш-системы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка методики исследования работоспособности крэш-системы электропоезда.

2. Разработка математической модели аварийного столкновения электропоезда, учитывающей механизм работы крэш-системы, необратимые деформации кузовов вагонов и динамические свойства тележек.

3. Проведение экспериментальных исследований характеристик конструктивных элементов крэш-системы для подтверждения адекватности разработанных математических моделей.

4. Оценка работоспособности крэш-системы на основе разработанной методики исследования.

5. Разработка конструктивных изменений устройства поглощения энергии электропоезда «Ласточка» для улучшения функциональных характеристик крэш-системы.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработана методика исследования работоспособности крэш-системы, основанная на численном моделировании процессов аварийного столкновения электропоезда с учетом нелинейных характеристик материалов, возможности значительного изменения конфигурации конструкций соударяющихся объектов и наличия контактного взаимодействия между ними.

2. Разработана математическая модель аварийного столкновения электропоезда, позволяющая оценить работоспособность крэш-системы по продольным ускорениям вагонов, остаточным деформациям их кузовов, а также условию сохранения контакта между колесами и рельсами с учетом механизма работы устройств поглощения энергии.

3. Исследованы факторы, влияющие на риск схода тележек с рельсов при аварийном столкновении, определена связь между возникновением отрыва колесных пар тележки от рельсов и характеристиками устройства поглощения энергии крэш-системы.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предлагаемая методика позволяет отработать конструкцию крэш-системы по заданным параметрам электропоезда и необходимым критериям на стадии проектирования.

2. Разработанная модель аварийного столкновения электропоезда может быть использована для доработки существующих и разработки новых сценариев столкновений в межгосударственном стандарте ГОСТ 32410-2013 «Крэш-системы аварийные железнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок. Технические требования и методы контроля».

3. В результате проведенных исследований предложены технические решения по снижению силы срабатывания устройства поглощения энергии электропоезда «Ласточ-

ка» для адаптации крэш-системы к столкновению с транспортным средством, имеющим конечную жесткость, существенно меньшую, чем у железнодорожного подвижного состава (крупногабаритным грузовым автомобилем, автобусом и др.).

4. Результаты исследований использованы на ООО «Уральские локомотивы» при оценке работоспособности аварийной крэш-системы электропоезда «Ласточка» согласно техническому заданию.

Методология и методы исследования. Исследование работоспособности крэш-системы базируется на численном моделировании процессов аварийного столкновения электропоезда с использованием метода конечных элементов с явной схемой интегрирования разрешающих уравнений. Подтверждение адекватности разработанных математических моделей основывается на экспериментах с натурными образцами. При разработке технических решений, обеспечивающих улучшение функциональных параметров крэш-системы, производилось обобщение существующих конструкций устройств поглощения энергии.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика исследования работоспособности крэш-системы электропоезда.
2. Математическая модель аварийного столкновения электропоезда.
3. Результаты исследования моделей упругопластического материала на основе экспериментов с разрушением тонкостенных стальных трубок.
4. Результаты верификации модели устройства поглощения энергии по данным разрушающих испытаний на стенде.
5. Результаты исследований работоспособности аварийной крэш-системы с применением разработанной модели.
6. Разработанные мероприятия по модификации конструкции устройства поглощения энергии для улучшения функциональных характеристик крэш-системы.

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается соответствием результатов численного моделирования данным, полученным в экспериментальных исследованиях.

Обоснованность результатов диссертационного исследования достигается базированием на строго доказанных и корректно используемых выводах фундаментальных и прикладных наук, таких как теоретическая механика, механика сплошных сред, метод конечных элементов, теория упругости и теория пластического течения.

Апробация результатов. Материалы диссертационной работы докладывались на конференциях и семинарах: «Научно-техническая конференция, посвященная 135-летию Свердловской железной дороги» (Екатеринбург, УрГУПС, 2014), «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии» (Санкт-Петербург, ПГУПС, 2015), «Техника и технологии наземного транспорта» (Екатеринбург, УрГУПС, 2015); «Проблемы и перспективы развития вагоностроения» (Брянск, БГТУ, 2016), «Инновационный транспорт-2016: специализация железных дорог» (Екатеринбург, УрГУПС, 2016). Основные положения диссертационной работы докладывались на заседаниях кафедры «Вагоны» (Екатеринбург, УрГУПС, в 2014-2016 гг.).

Публикации. Основные положения диссертационной работы и научные результаты опубликованы в 7 печатных работах, в том числе 2 статьи опубликованы в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций».

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1, 6, 7] – разработка математических моделей, проведение численных

экспериментов, обобщение результатов и формулировка выводов; [3] – разработка математических моделей, участие в проведении натуральных испытаниях устройства поглощения энергии электропоезда «Ласточка», верификация устройства поглощения энергии на основе сравнения расчетных и экспериментальных результатов его разрушения, проведение численных экспериментов, анализ результатов и разработка рекомендаций по улучшению работоспособности крэш-системы; [5] – описание математического аппарата модели аварийного столкновения подвижного состава с препятствием.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, состоящего из 76 наименований. Текст диссертации содержит 149 страниц, включает 70 рисунков и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

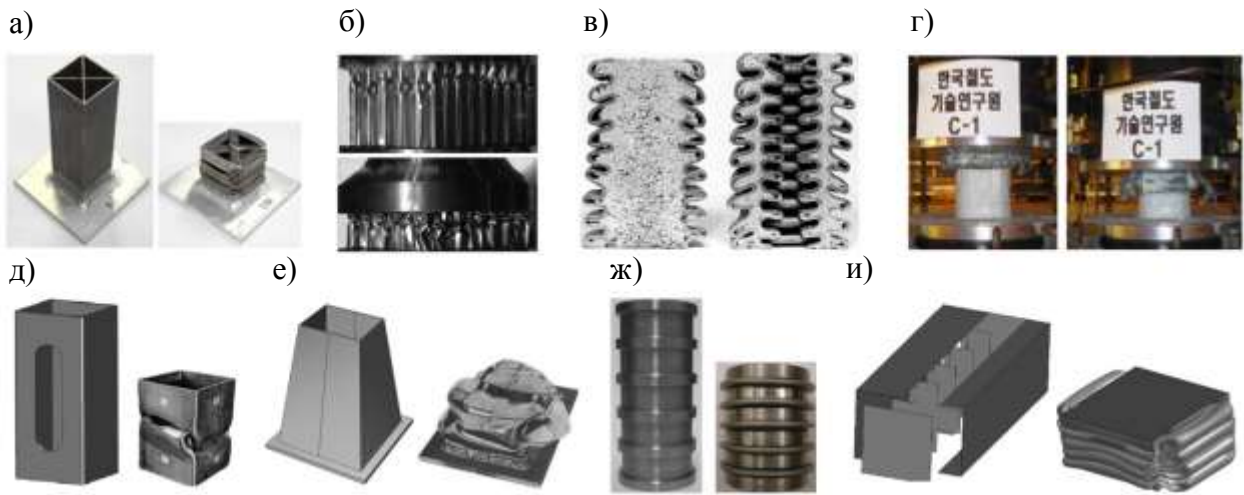
Во введении обоснована актуальность темы исследования, изложена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, выносимые на защиту положения, а также приведены степень достоверности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

В первом разделе настоящей диссертационной работы выполнен краткий обзор исследований нагруженности вагонов при маневровых и аварийных соударениях; сделан обзор характеристик и конструктивных особенностей устройств поглощения энергии аварийных крэш-систем; проведен обзор нормативных требований к аварийным крэш-системам пассажирского подвижного состава.

По результатам обзора научных работ установлено, что применение метода конечных элементов с явной схемой интегрирования разрешающих уравнений по времени является наиболее целесообразным подходом решения задачи моделирования аварийного столкновения, так как позволяет определить кинематические параметры, уровень нагрузок и напряженно-деформированное состояние вагонных конструкций с возможностью выявления остаточных деформаций в кузовах вагонов и учетом нелинейного характера работы узлов крэш-системы.

В работах, посвященных созданию устройств поглощения энергии аварийных крэш-систем, особое внимание отводится следующим характеристикам: энергоемкости, силе срабатывания и стабильности осевой силы деформирования. Энергоемкость устройства – это количество энергии, затрачиваемое на максимальное необратимое деформирование его конструкции; сила срабатывания равна силе, после которой начинается пластическое деформирование конструкции устройства. По результатам обзора установлено, что устройства поглощения энергии, как правило, изготавливаются из тонкостенных металлических конструкций, в которые внедряют вспомогательные ячейки, сотовые структуры, вспененные металлы, а также применяют другие технические решения для обеспечения необходимых характеристик (рисунок 1).

Проведенный обзор нормативных документов показал, что контроль выполнения требований к крэш-системе проводится по сценариям аварийных столкновений, так ГОСТ 32410-2013 регламентирует два сценария: столкновение на железнодорожном переезде с автомобилем и столкновение с грузовым вагоном. При этом крэш-система должна обеспечивать средние продольные ускорения единиц подвижного состава не более 50 м/с^2 и ограничивать остаточные деформации кузовов вагонов в указанных стандартом пределах.



- а) – внедрение вспомогательных ячеек; б) – внедрение сотовых структур;
 в) – внедрение вспененных металлов; г) – применение композитов; д) – создание перфораций;
 е) – проектирование уклона граней; ж) – создание выточек; и) – внедрение диафрагм

Рисунок 1 – Технические решения по улучшению характеристик устройств поглощения энергии

Отмечено, что препятствия в нормативных сценариях столкновений задаются абсолютно твердыми телами. Вместе с тем, проведенный анализ реального столкновения электропоезда «Ласточка» с автомобилем марки МАЗ показал, что автомобиль претерпел значительные разрушения, при этом в электропоезде устройство поглощения энергии не сработало, так как не имело остаточных деформаций, и произошел сход первой тележки. Таким образом, этот аварийный случай вызвал вопрос относительно целесообразности представления препятствия как абсолютно твердого тела, поскольку это не позволит в полной мере учесть условия столкновения и может привести к серьезным недочетам при проектировании крэш-систем.

Второй раздел посвящен разработке методики исследования работоспособности крэш-системы электропоезда на основе применения программы компьютерного моделирования, реализующей метод конечных элементов.

При создании методики исследования разрабатывалась расчетная схема модели аварийного столкновения электропоезда «Ласточка», позволяющая в достаточной мере учесть условия аварийного столкновения (рисунок 2). В модели головной и первый прицепной вагоны имеют подробное трехмерное представление. В тележках задаются силовые связи, моделирующие жесткость пружин рессорного подвешивания $c_{T1,2}$ и коэффициенты рассеивания энергии демпферов рессорного подвешивания η_{T1-4} . Остальные вагоны моделируются в одномерной постановке: пружины сцепных устройств жесткостью $c_{сц}$ и массой двух сцепок $M_{сц}$ соединяются последовательно с упругим элементом с жесткостью кузова вагона c_k и массой вагона M_B . В начальный момент электропоезд имеет скорость \vec{v}_0 , а препятствие находится в состоянии покоя. По результатам моделирования определяются параметры аварийного столкновения:

- продольные ускорения вагонов \vec{a}_z и необратимые деформации кузовов вагонов ϵ_k для проверки нормативных требований к крэш-системе;
- количество поглощенной энергии устройством поглощения энергии $E_a^{УПЭ}$ и крэш-элементами сцепных устройств $E_a^{КЭ}$ для исследования работы крэш-системы;
- поля вертикальных перемещений электропоезда \vec{u}_y для проверки условия сохранения контакта между колесами и рельсами и последующей оценки риска схода тележек.

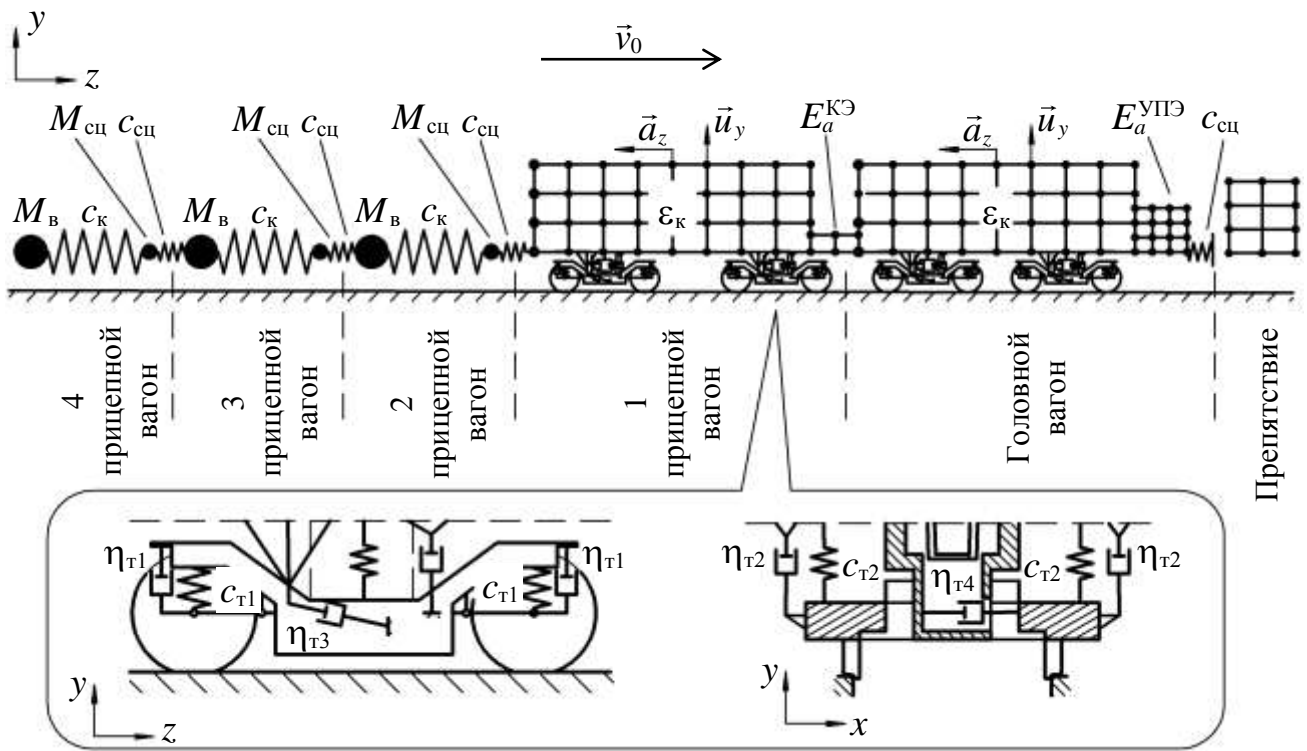


Рисунок 2 – Расчетная схема модели аварийного столкновения электропоезда «Ласточка»

Уравнение движения системы конечных элементов расчетной схемы, представленной выше, имеет следующий вид

$$[M]\{\ddot{u}\} = - \int_{\Omega} [B]^T \{\sigma\} d\Omega, \quad (1)$$

где $[M]$ – матрица масс системы конечных элементов;

$\{\ddot{u}\}$ – вектор узловых ускорений;

$[B]$ – матрица, связывающая деформации с перемещениями;

$\{\sigma\}$ – вектор напряжений;

Ω – область конечных элементов.

Левая часть уравнения представляет собой силы инерции, которые возникают при взаимодействии объектов столкновения, а правая часть дает вектор внутренних сил, возникающих при сопротивлении материала деформированию. Матрица масс системы конечных элементов определяется по формуле

$$[M] = \int_{\Omega} \rho [N]^T [N] d\Omega, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала;

$[N]$ – матрица функции формы системы конечных элементов.

Интегрирование разрешающих уравнений по времени осуществляется методом центральных разностей, в котором время моделируемого процесса $0 \leq t \leq t_E$ делится на временные шаги Δt^n , n – номер временного шага, а t_E – время завершения процесса. В соответствии с методом ускорения узлов на текущем шаге t^n определяются

$$\ddot{u}^n = [M]^{-1} \{f\}^n, \quad (3)$$

где $\{f\}^n$ – вектор узловых сил.

По известным ускорениям определяются скорости узлов на полушаге $t^{n+1/2}$

$$\dot{u}^{n+1/2} = \dot{u}^{n-1/2} + \ddot{u}^n \cdot \Delta t^n. \quad (4)$$

Перемещения узлов на временном шаге t^{n+1} вычисляются по формуле

$$u^{n+1} = u^n + \dot{u}^{n+1/2} \cdot \Delta t^{n+1/2}. \quad (5)$$

Схема интегрирования разрешающих уравнений представлена на рисунке 3.

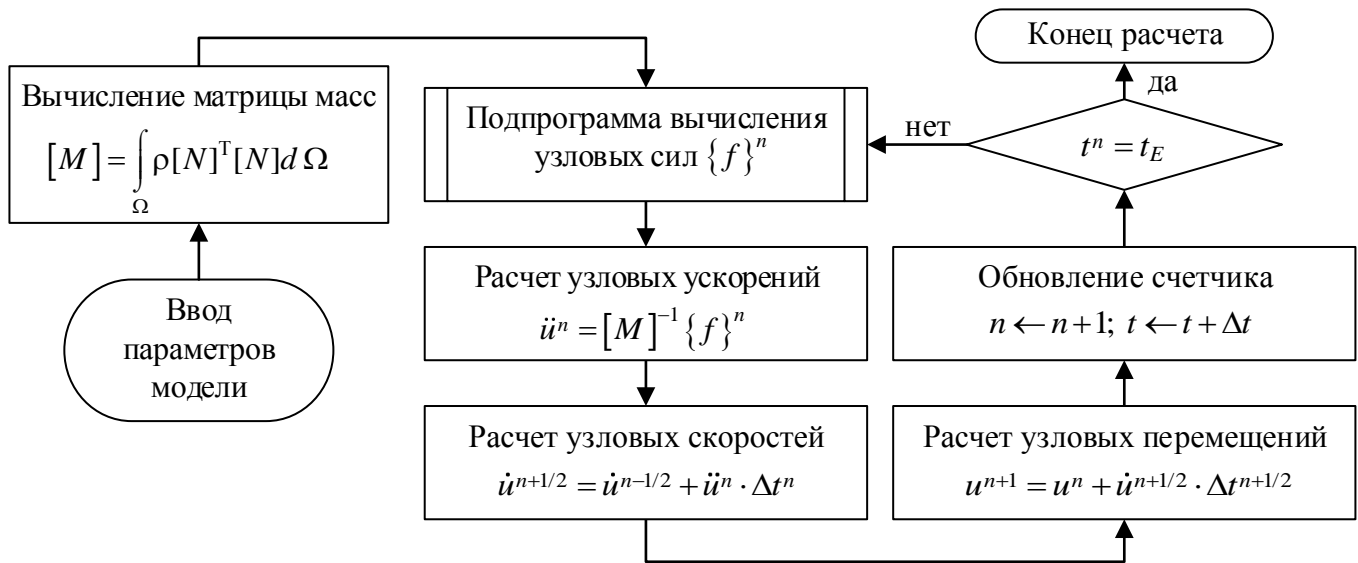


Рисунок 3 – Схема интегрирования разрешающих уравнений

Подпрограмма вычисления узловых сил в приведенной схеме включает шаги:

1) обновление вектора скорости деформаций элемента

$$\{\dot{\varepsilon}\}^{n-1/2} = [B] \dot{u}^{n-1/2}; \quad (6)$$

2) обновление вектора напряжений $\{\sigma\}^n$ элемента с использованием физических соотношений моделей материалов, которые представляют собой функцию зависимости между вектором напряжения и вектором скорости деформаций

$$\{\sigma\}^n = \Phi(\{\dot{\varepsilon}\}^{n-1/2}); \quad (7)$$

3) обновление внутренних узловых сил элемента

$$\{f_e\}^n = \int_{\Omega^e} [B]^T \{\sigma\}^n d\Omega. \quad (8)$$

По результатам моделирования определяются поля перемещений u_{ij} , скоростей \dot{u}_{ij} , ускорений \ddot{u}_{ij} , деформаций ε_{ij} и напряжений σ_{ij} системы конечных элементов на каждом временном шаге.

Методика исследования работоспособности крэш-системы электропоезда описывалась алгоритмом, представленным на рисунке 4. На первом этапе проводится декомпозиция объектов столкновения на подсистемы с разбиением расчетной области на конечные элементы. Далее для каждой подсистемы задается модель материала. На следующем этапе подтверждается адекватность математических моделей на основе экспериментальных исследований. Впоследствии отдельные подсистемы связываются друг с другом в общую модель аварийного столкновения. Затем производится решение задачи в программе, реализующей метод конечных элементов, в настоящей работе для этого использовался программный комплекс LS-DYNA. Далее проводится обработка результатов с определением исследуемых параметров аварийного столкновения. На последнем этапе производится интерпретация результатов, и дается оценка работоспособности крэш-системы. Если результат не соответствует поставленным требованиям, то производятся изменения в конструкции устройства поглощения энергии (УПЭ), и этапы моделирования повторяются.

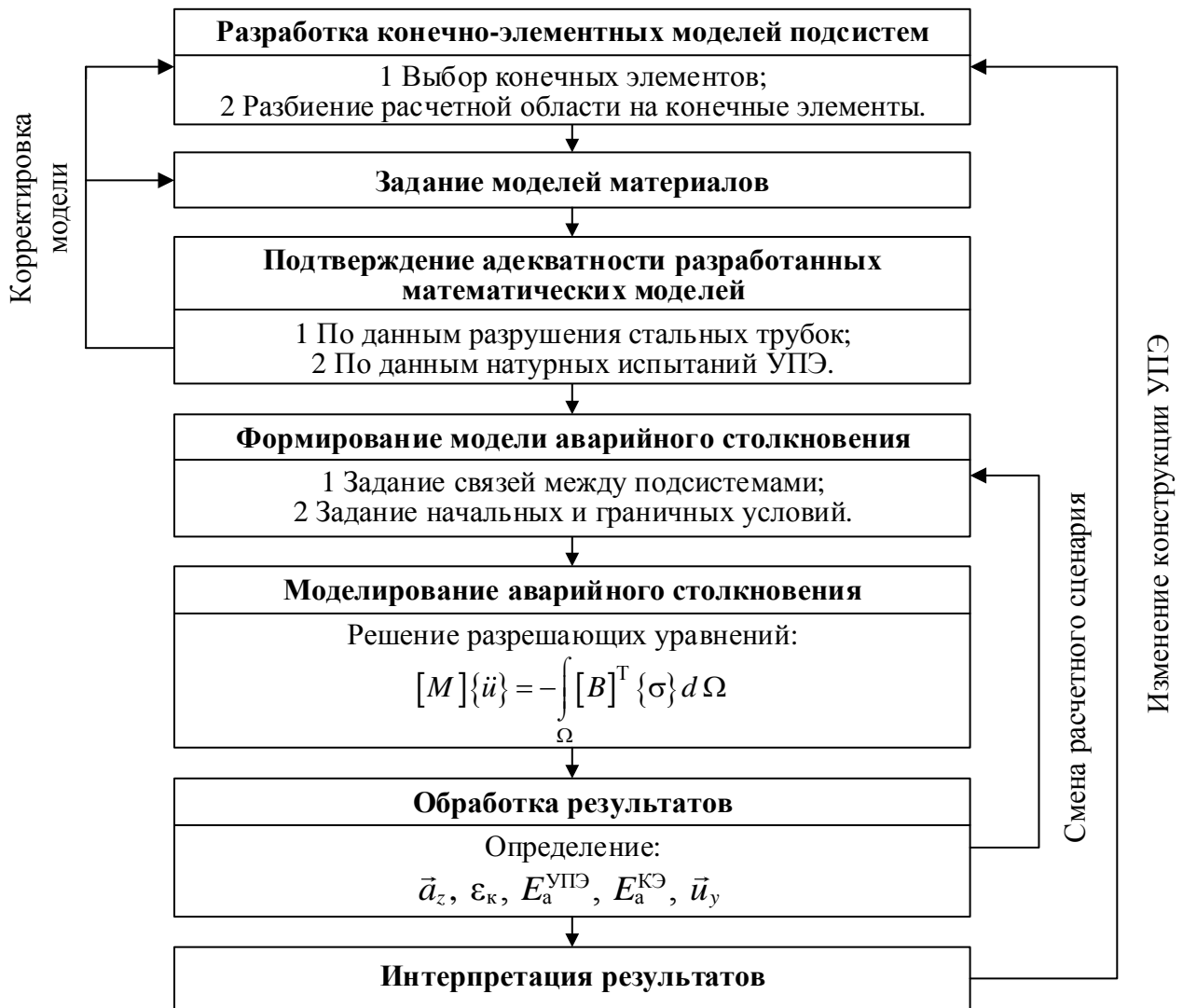
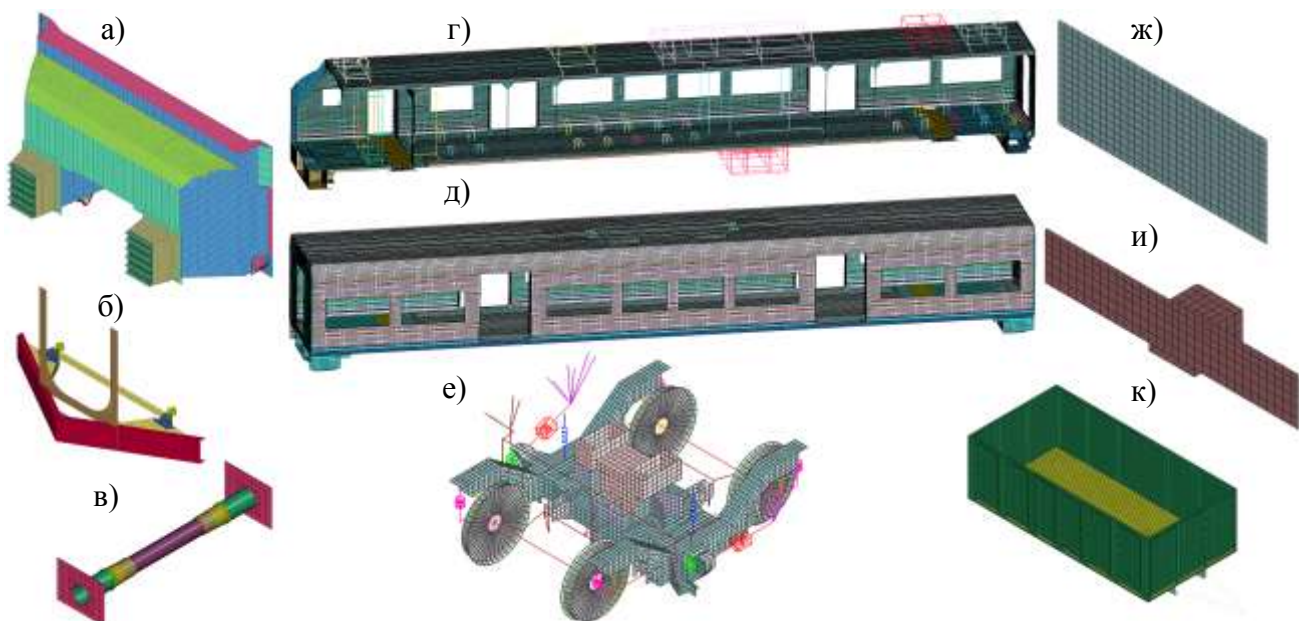


Рисунок 4 – Алгоритм исследования работоспособности крэш-системы электропоезда

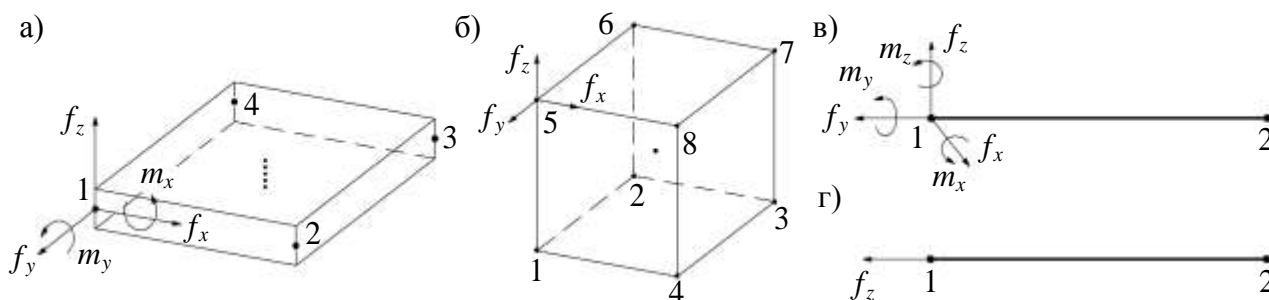
В соответствии с методикой исследования разработаны конечно-элементные модели: устройство поглощения энергии, путеочиститель, кузова головного и первого прицепного вагонов, крэш-элемент сцепного устройства, тележка, препятствия по нормам и деформируемое препятствие (автомобиль), которые показаны на рисунке 5.



а) – устройство поглощения энергии; б) – путеочиститель; в) – крэш-элемент сцепного устройства;
г) – кузов головного вагона; д) – кузов первого прицепного вагона; е) – тележка;
ж) – автомобиль (по нормам); и) – грузовой вагон (по нормам); к) – деформируемый автомобиль

Рисунок 5 – Конечно-элементные модели подсистем объектов столкновения

При разработке конечно-элементных моделей использовались основные элементы: оболочечные, объемные и балочные; а также вспомогательные элементы: силовые (пружинные и демпфирующие) связи и сосредоточенные массы. На рисунке 6 представлено схематическое отображение элементов с указанием искомых узловых сил f_i и моментов m_i .



а) – оболочечный элемент; б) – объемный элемент; в) – балочный элемент; г) – силовая связь

Рисунок 6 – Схематическое отображение элементов

Затем для каждой подсистемы задавалась модель материала:

1) для препятствий по нормам – модель абсолютно твердого материала. Модель описывает тела, не поддающиеся деформации;

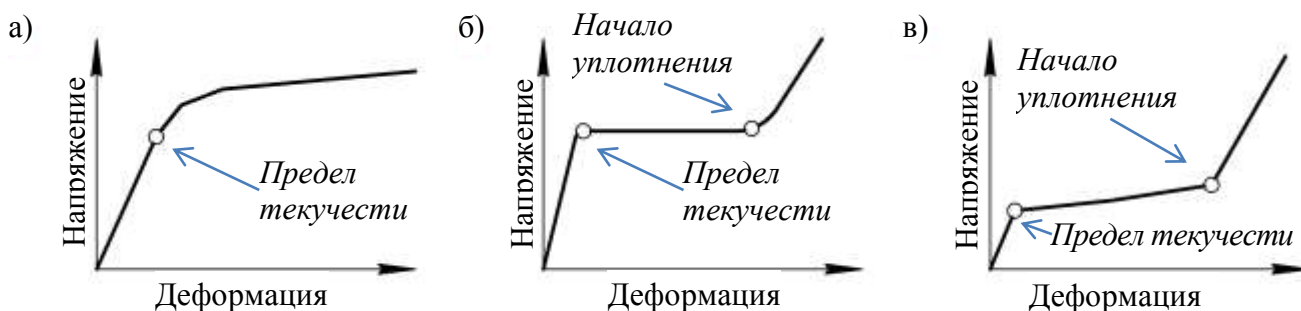
2) для тележек – модель упругого материала. Модель описывает изотропные тела, в которых напряжения линейно зависят от деформаций;

3) для устройства поглощения энергии, путеочистителя, кузовов вагонов, крэш-элементов сцепных устройств и деформируемого препятствия – модель упругопластического материала. Модель описывает изотропные тела, которые при нагружении работают упруго, пока не выполняется условие текучести, а затем в них развиваются упругие и пластические деформации;

4) для сотовых структур в устройстве поглощения энергии – модель ячеистого материала. Модель описывает ортотропные тела с упругопластическим поведением и возможностью уплотнения материала при значительных деформациях;

5) для пеноалюминия в устройстве поглощения энергии – модель разрушаемого пеноматериала. Модель описывает изотропные тела с упругопластическим поведением и возможностью уплотнения материала при значительных деформациях.

Идеализированные диаграммы «напряжение-деформация» физически нелинейных моделей материалов при одноосном нагружении представлены на рисунке 7.



а) – модель упругопластического материала; б) – модель ячеистого материала;

в) – модель разрушаемого пеноматериала

Рисунок 7 – Идеализированные диаграммы «напряжение-деформация»

В соответствии с принятой расчетной схемой производилась сборка конечно-элементных моделей подсистем в общую модель аварийного столкновения с добавлением силовых связей и сосредоточенных масс, как показано на рисунке 8.

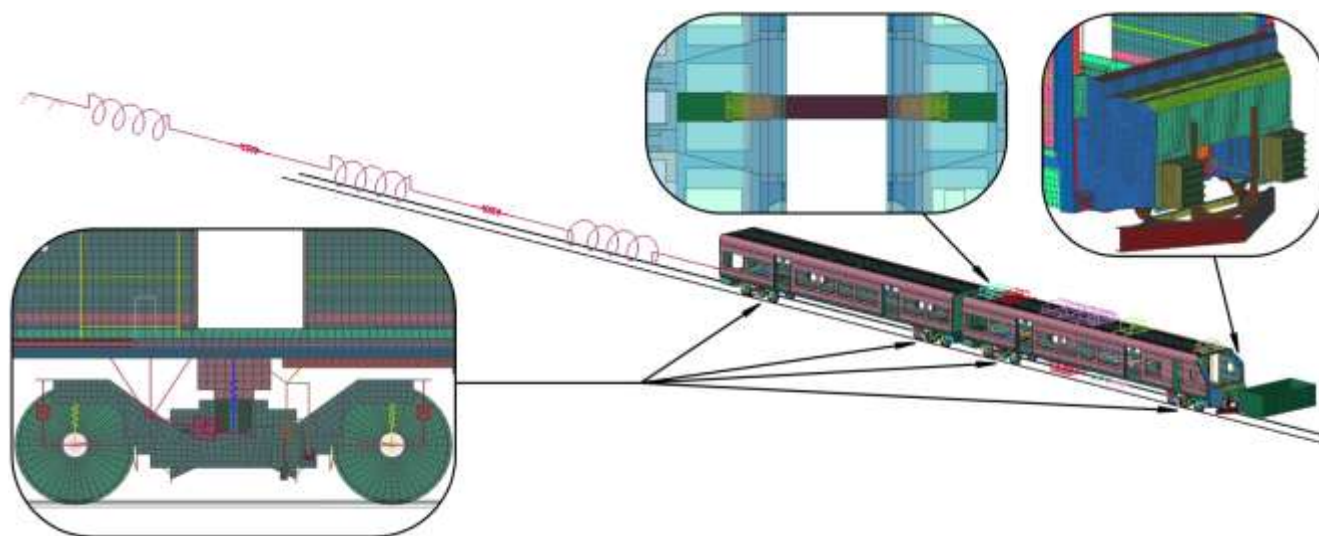


Рисунок 8 – Общая конечно-элементная модель аварийного столкновения

В третьем разделе в соответствии с методикой исследования проведены опыты по необратимому деформированию стальных трубок и выполнена верификация модели устройства поглощения энергии на основе натуральных испытаний.

В опытах по необратимому деформированию стальных трубок производилось сопоставление данных экспериментов с результатами численного моделирования. По итогам исследования производился выбор между моделью кусочно-линейной пластичности и моделью пластичности Джонсона-Кука для моделирования упругопластического изотропного материала в модели аварийного столкновения электропоезда. Принципиальное различие данных моделей заключается в способе определения напряжений в зоне пластических деформаций σ_y , Па, которые вычисляются по формулам:

1) в модели кусочно-линейной пластичности

$$\sigma_y = \left(1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{\text{ЭКВ}}^p}{C} \right)^{1/q} \right) \left(\sigma_0 + f_h(\varepsilon_{\text{ЭКВ}}^p) \right), \quad (9)$$

где $\dot{\varepsilon}_{\text{ЭКВ}}^p$ – эквивалентная скорость пластической деформации, с^{-1} ;

C – коэффициент, учитывающий влияние скорости деформации, с^{-1} ;

q – показатель, учитывающий влияние скорости деформации;

σ_0 – предел текучести материала при статическом нагружении, Па;

$f_h(\varepsilon_{\text{ЭКВ}}^p)$ – функция пластического упрочнения материала, Па;

$\varepsilon_{\text{ЭКВ}}^p$ – эквивалентная пластическая деформация;

2) в модели пластичности Джонсона-Кука

$$\sigma_y = \left(A + B(\varepsilon_{\text{ЭКВ}}^p)^N \right) \left(1 + c \cdot \ln \dot{\varepsilon}_{\text{ЭКВ}}^p \right), \quad (10)$$

где A – коэффициент, характеризующий предел текучести материала, Па;

B – коэффициент, характеризующий пластическое упрочнение материала, Па;

N – показатель, характеризующий пластическое упрочнение материала;

c – коэффициент, учитывающий влияние скорости деформации.

В исследовании поставлено пять опытов со стальными трубками (рисунок 9): в первом опыте – осевое деформирование прямоугольной трубки; во втором – осевое деформирование трубки с перфорацией; в третьем – глобальная потеря устойчивости

квадратной трубки; в четвертом – поперечное деформирование квадратной трубки; в пятом – поперечное деформирование круглой трубки.

Для оценки адекватности рассматриваемых моделей в первом, четвертом и пятом опытах анализировалась средняя сила деформирования F_m , Н, которая равна

$$F_m = \frac{E_a}{\Delta l}, \quad (11)$$

где E_a – количество энергии, затраченное на деформирование образца, Дж;

Δl – величина изменения линейных размеров образца после деформации, м.

Во втором опыте оценивался коэффициент силы деформирования C_F , равный

$$C_F = \frac{F_m}{F_p}, \quad (12)$$

где F_m – средняя сила деформирования, Н;

F_p – сила срабатывания, Н.

В третьем опыте сопоставлялись формы пластических деформаций.

По результатам исследования установлено, что в случае применения модели кусочно-линейной пластичности расхождение расчетного и экспериментального значений средней силы деформирования составило: в первом опыте – 8,1%, в четвертом – 1,7% и пятом – 5,8%; в модели Джонсона-Кука расхождение результатов расчета с экспериментальными данными достигало 56,0%. Во втором опыте расхождения расчетного и экспериментального значений коэффициента силы деформирования составило для модели кусочно-линейной пластичности – 13,1%, а для модели Джонсона-Кука – 32,3%. В третьем опыте только модель Джонсона-Кука смогла обеспечить точное моделирование глобальной потери устойчивости трубки.

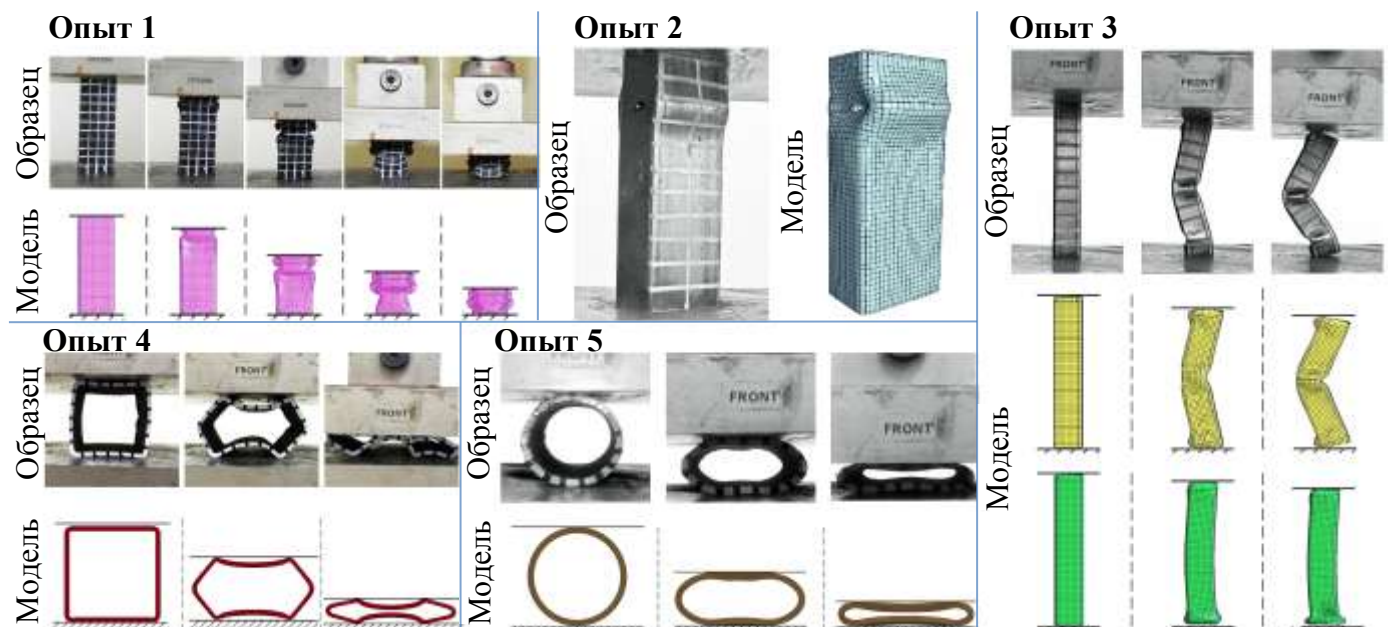


Рисунок 9 – Результаты опытов по необратимому деформированию стальных трубок

На основе полученных данных сделан выбор в пользу модели кусочно-линейной пластичности для применения в модели аварийного столкновения электропоезда.

Для верификации модели устройства поглощения энергии результаты натуральных испытаний сопоставлялись с данными, полученными при моделировании процессов деформирования данного устройства в режимах, эквивалентных условиям проведения испытаний. Сопоставлению подвергались: характер деформирования устройства поглощения энергии (рисунок 10) и его энергоемкость.

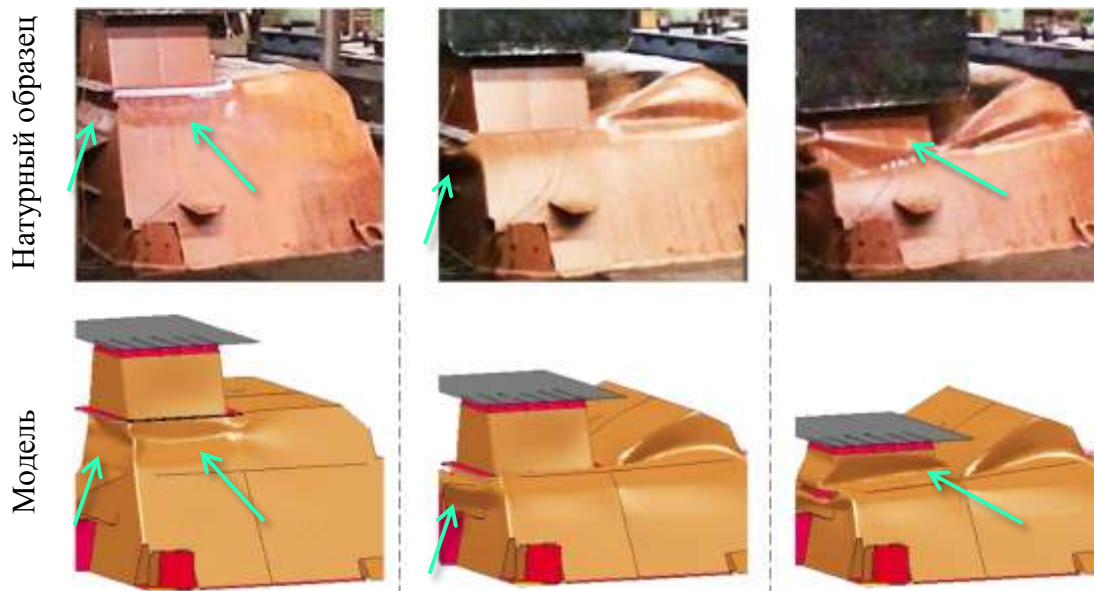


Рисунок 10 – Характер деформирования натурального образца и модели

Результат моделирования показал полное соответствие характера деформирования натурному образцу. Расчетные и экспериментальные значения энергоемкости составили 2,33 и 2,54 МДж соответственно. Расхождение полученных результатов составило 8,2%, что позволило сделать вывод об адекватности разработанной модели устройства поглощения энергии.

В четвертом разделе производилась оценка работоспособности крэш-системы электропоезда «Ласточка» на основе модели аварийного столкновения электропоезда. Моделировались сценарии столкновений по ГОСТ 32410-2013: столкновение с автомобилем массой 10 т на скорости 72 км/ч и столкновение с грузовым вагоном массой 80 т на скорости 36 км/ч, кроме того рассматривался сценарий столкновения с деформируемым автомобилем массой 10 т на скорости 72 км/ч. Результаты моделирования показали, что в нормативных сценариях столкновений кинетическая энергия прежде всего поглощается за счет необратимого деформирования устройства поглощения энергии. В то же время в сценарии столкновения с деформируемым автомобилем крэш-система не сработала – кинетическая энергия поглощалась за счет разрушения препятствия, как и в случае реального столкновения электропоезда «Ласточка» с автомобилем МАЗ (рисунок 11).



Рисунок 11 – Необратимые деформации устройства поглощения энергии

При этом определено, что при столкновении электропоезда с деформируемым автомобилем происходит отрыв колесных пар первой тележки от рельсов на 7 мм (рисунок 12), что свидетельствует о повышенном риске схода с рельсов.



Рисунок 12 – Распределение вертикальных перемещений в модели

Выявлено, что формы пластических деформаций кузова автомобиля вызывают вертикальные смещения области контакта препятствия и устройства поглощения энергии. Тем временем конструкция устройства не имеет пластических деформаций, в результате чего полностью передает вертикальную составляющую ударной нагрузки на кузов вагона, что приводит к вертикальному смещению передней части кузова вагона.

Таким образом, для снижения риска схода необходимо разработать конструктивные изменения устройства поглощения энергии, чтобы обеспечить поглощение энергии при столкновении электропоезда с препятствием, имеющим конечную жесткость существенно меньшую, чем у железнодорожного подвижного состава. Решение такой задачи заключается в снижении силы срабатывания устройства поглощения энергии путем уменьшения локальной жесткости его конструкции. Однако это техническое решение также приведет к снижению энергоемкости, что может негативно повлиять на работоспособность крэш-системы. Учитывая данное противоречие, предложен алгоритм мероприятий по совершенствованию устройства поглощения энергии, представленный на рисунке 13, в котором:

1) на первом этапе производится выбор вспомогательных крэш-элементов, позволяющих обеспечить устройству поглощения энергии наибольший прирост удельной энергоемкости S_E , Дж/кг, которая определяется по формуле

$$S_E = \frac{E_a}{M_a}, \quad (13)$$

где M_a – масса устройства поглощения энергии, кг.

2) на втором этапе применяются технические решения для снижения силы срабатывания и внедряются выбранные крэш-элементы. При этом разработанные конструктивные изменения не должны привести к снижению энергоемкости устройства поглощения энергии, а также увеличению его массы более чем на 5%;

3) на заключительном этапе производится оценка работоспособности модифицированной крэш-системы. Конечный результат модификации должен обеспечить срабатывание устройства поглощения энергии при столкновении с деформируемым автомобилем, то есть изменение линейных размеров его конструкции Δl должно быть выше нуля. Кроме того принятые конструктивные изменения не должны отрицательно повлиять на функциональные характеристики крэш-системы: способность снижать ускорения вагонов \bar{a}_z и необратимые деформации кузовов ε_k .

Для выбора вспомогательных крэш-элементов разрабатывались исполнения устройства поглощения энергии: со стальными компонентами в виде уголков; со стальными компонентами коробчатого типа; с алюминиевыми сотовыми структурами; с сэндвич панелями из пеноалюминия (рисунок 14). Определение удельной энергоемкости S_E каждого исполнения осуществлялось путем моделирования их разрушения от столкновения с абсолютно твердой стенкой на скорости 20 м/с.

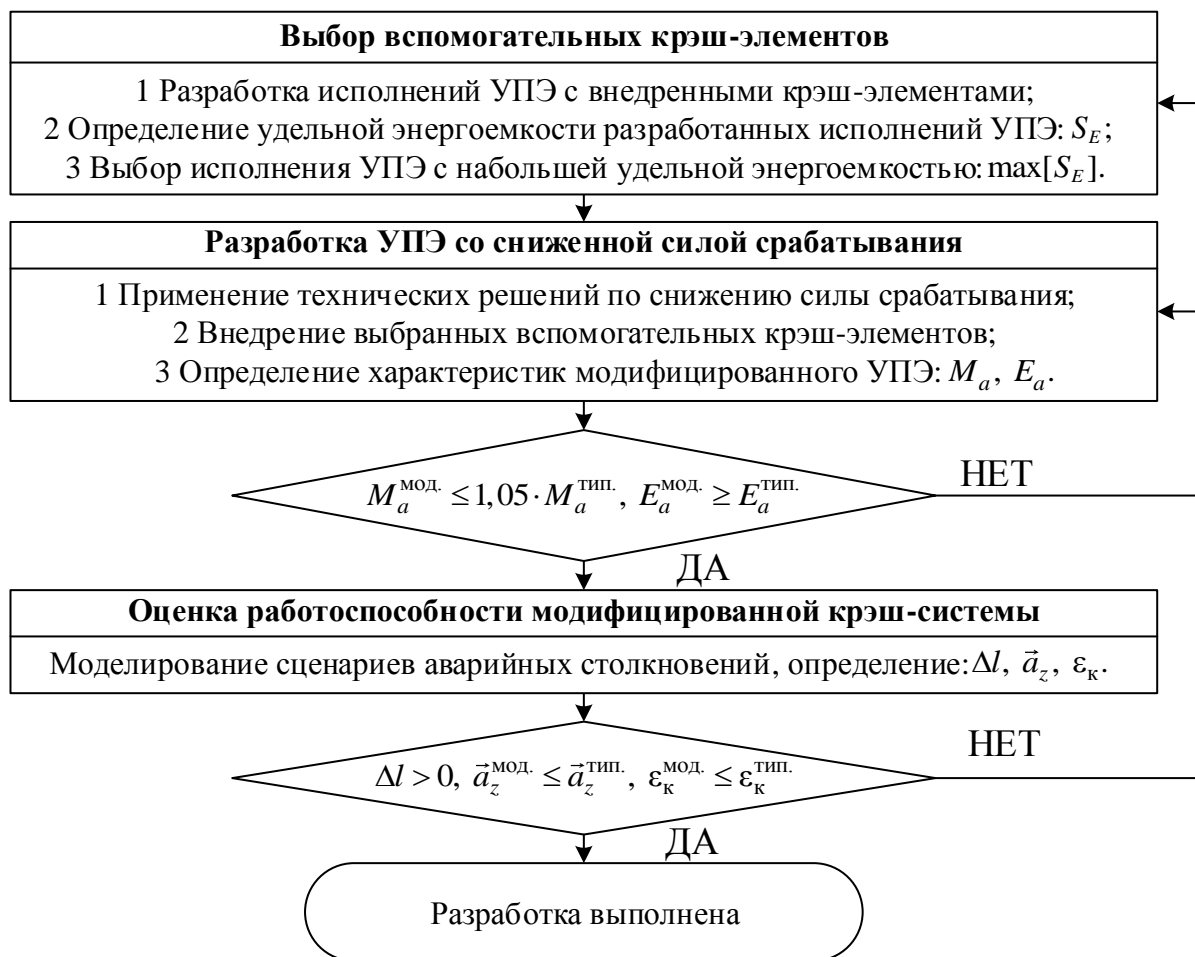
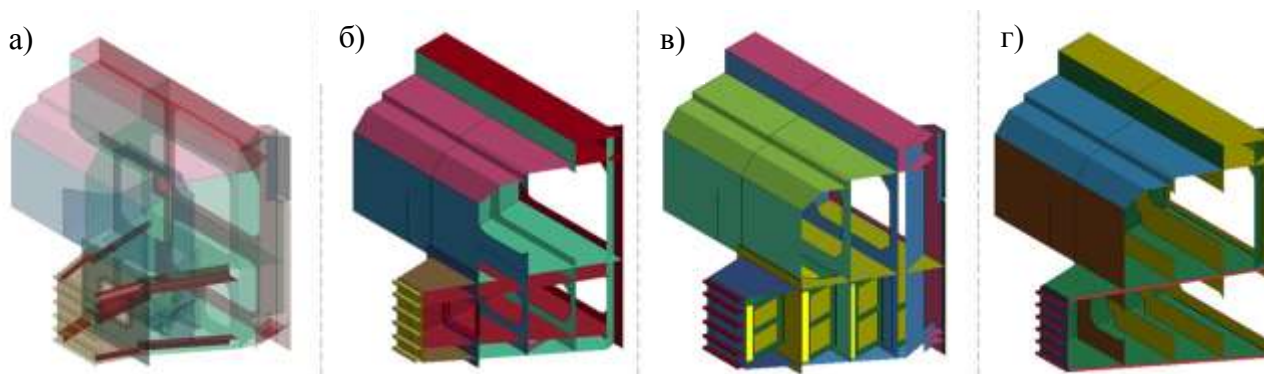


Рисунок 13 – Алгоритм совершенствования устройства поглощения энергии

На основе полученных результатов установлено, что наибольший прирост удельной энергоемкости (до 50%) имеет исполнение устройства поглощения энергии со стальными компонентами в виде уголков (рисунок 14-а). Вследствие этого произведен выбор в пользу данных конструктивных элементов для компенсации уровня энергоемкости устройства поглощения энергии после снижения силы срабатывания.



а) – со стальными компонентами в виде уголков; б) – со стальными компонентами коробчатого типа
в) – с алюминиевыми сотовыми структурами; г) – с сэндвич панелями из пеноалюминия

Рисунок 14 – Исполнения устройства поглощения энергии

Для снижения силы срабатывания в устройстве поглощения энергии были применены технические решения: уменьшена толщина стенок его фронтальных блоков с 6 до 5 мм, и внедрены перфорации. В таблице 1 приведены итоговые изменения в устройстве поглощения энергии.

На рисунке 15 представлены диаграммы деформирования модифицированного и типового устройства поглощения энергии при их полном разрушении в результате столкновения с абсолютно твердой стенкой на скорости 20 м/с.

Таблица 1 – Итоговые изменения конструкции устройства поглощения энергии

| Номер изменения | Описание изменения | Цель изменения | Вид изменений |
|-----------------|---|---|---------------|
| 1 | Уменьшение толщины стенок зоны <i>a</i> | Для снижения силы срабатывания устройства | |
| 2 | Создание перфораций в зоне <i>b</i> | Для предотвращения скачков продольных усилий при деформировании области перехода от зоны <i>a</i> в зону <i>b</i> | |
| 3 | Внедрение уголков в зону <i>c</i> | Для компенсации уровня энергоемкости устройства поглощения энергии после снижения силы срабатывания | |

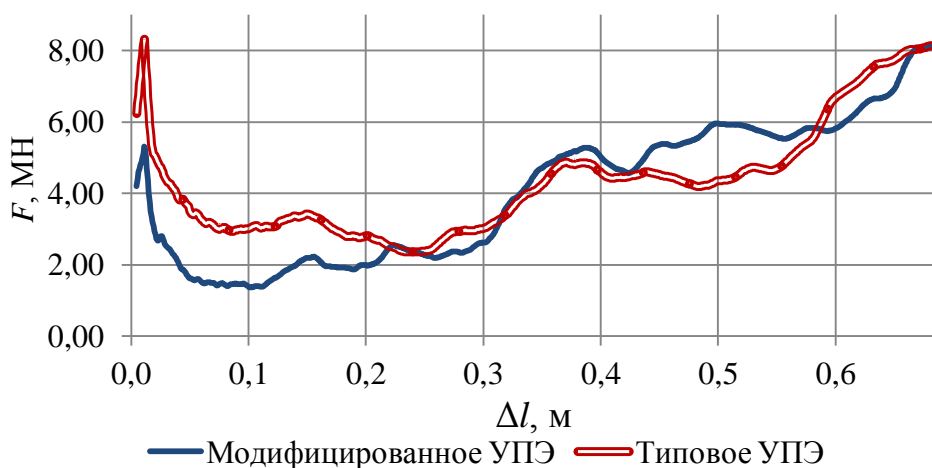


Рисунок 15 – Диаграмма деформирования устройства поглощения энергии

Установлено, что разработанные конструктивные изменения устройства поглощения энергии позволили уменьшить силу срабатывания на 3,1 МН, при этом энергоемкость нового исполнения осталась на прежнем уровне.

На заключительном этапе проведено моделирование аварийного столкновения электропоезда «Ласточка» с применением модифицированного устройства поглощения энергии. В таблице 2 приведены расчетные параметры аварийных столкновений при применении типовой и модифицированной крэш-системы: продольные ускорения головного вагона \vec{a}_z , количество поглощенной энергии устройством поглощения энергии $E_a^{УПЭ}$ и количество поглощенной энергии крэш-элементами сцепных устройств $E_a^{КЭ}$.

Таблица 2 – Расчетные параметры аварийных столкновений

| Сценарий аварийного столкновения | $\vec{a}_z, \text{м/с}^2$ | | $E_a^{УПЭ}, \text{МДж}$ | | $E_a^{КЭ}, \text{МДж}$ | |
|---|---------------------------|-------|-------------------------|-------|------------------------|-------|
| | Тип. | Мод. | Тип. | Мод. | Тип. | Мод. |
| Столкновение с автомобилем (по нормам) | 46,55 | 43,75 | 1,601 | 1,670 | 0,064 | 0,058 |
| Столкновение с грузовым вагоном (по нормам) | 29,75 | 29,52 | 1,871 | 1,935 | 0,422 | 0,409 |
| Столкновение с деформируемым автомобилем | 19,74 | 17,00 | 0,047 | 0,393 | 0,006 | 0,004 |

По результатам моделирования установлено, что разработанные конструктивные изменения не повлияли отрицательно на функциональные характеристики крэш-системы: продольные ускорения вагонов и необратимые деформации кузовов вагонов в сценариях столкновений остались на том же уровне, как и в случае применения типового устройства поглощения энергии. При этом модифицированное устройство поглощения энергии включается в процесс поглощения энергии при столкновении с деформируемым автомобилем, а анализ вертикальных перемещений колесных пар показал, что контакт между колесными парами и рельсами сохранялся (рисунок 16).

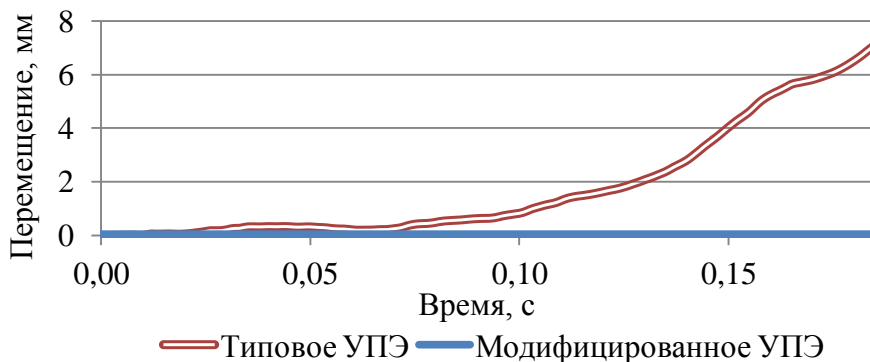


Рисунок 16 – Графики вертикальных перемещений колесных пар первой тележки головного вагона в процессе столкновения с деформируемым автомобилем

Таким образом, модифицированное устройство поглощения энергии адаптивно к столкновению электропоезда с объектами сравнительно низкой жесткости и за счет этого снижает риск схода тележек с рельсов, при этом не оказывает отрицательного влияния на другие функциональные характеристики крэш-системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе обзора исследований нагруженности вагонов при маневровых и аварийных соударениях и обзора нормативных требований к аварийным крэш-системам пассажирского подвижного состава установлено, что задача оценки работоспособности крэш-систем связана с определением ускорений и остаточных деформаций кузовов поезда и решается за счет использования метода конечных элементов с явной схемой интегрирования разрешающих уравнений.

2. Разработана методика исследования работоспособности крэш-системы электропоезда, которая базируется на нелинейном динамическом анализе объектов аварийного столкновения с использованием метода конечных элементов, что позволяет учитывать: нелинейные характеристики материалов, возможность значительного изменения конфигурации конструкций соударяющихся объектов и наличие контактного взаимодействия между ними.

3. Разработана уточненная модель аварийного столкновения электропоезда «Ласточка», в которой головной и первый прицепной вагон имеют подробное трехмерное представление с учетом динамических свойств тележек, а остальные вагоны рассматриваются как система из сосредоточенных масс, соединенных между собой упругими связями. Предложенная модель позволяет определить ускорения единиц подвижного состава, необратимые деформации кузовов вагонов и крэш-системы, оценить риск схода тележек.

4. На основе результатов экспериментов с разрушением стальных трубок идентифицирована модель кусочно-линейной пластичности, обеспечивающая более близкое к реальному процессу моделирование упругопластического деформирования материала, по сравнению с моделью Джонсона-Кука.

5. На основе результатов натуральных испытаний верифицирована модель устройства поглощения энергии: установлено полное соответствие характера деформирования модели и натурального образца, а расчетная энергоемкость устройства отличалась на 8,2% от энергоемкости, определенной по результатам испытаний.

6. Результаты численного моделирования показали, что расчетный сценарий столкновения с автомобилем по нормам задает более жесткие условия для выполнения требований к аварийной крэш-системе в сравнении со сценарием столкновения с деформируемым автомобилем: продольные ускорения головного вагона во втором случае оказались ниже на 36%. Тем не менее, при моделировании сценария с деформируемым препятствием устройство поглощения энергии не сработало и обнаружен высокий риск схода первой тележки, что соответствовало последствиям реального столкновения электропоезда «Ласточка» с автомобилем МАЗ.

7. Исследованы факторы, влияющие на риск схода тележек при аварийном столкновении с деформируемым препятствием. Выявлено, что формы пластических деформаций препятствия способствовали вертикальному смещению области контакта с устройством поглощения энергии. При этом в случае, когда устройство при столкновении не сработало, вся вертикальная составляющая ударной нагрузки передалась на кузов вагона и привела к смещению его передней части с отрывом колесных пар от рельсов на 7 мм. В то же время разработанное устройство, адаптивное к столкновениям с препятствиями сравнительно низкой жесткости, способствовало сохранению контакта между колесами и рельсами.

8. Предложен алгоритм совершенствования устройств поглощения энергии, который подразумевает выбор конструктивных элементов для увеличения энергоемкости устройства поглощения энергии и выбор технических решений для снижения силы срабатывания. Такой подход позволяет создать модифицированное устройство с массой и энергоемкостью эквивалентными аналогичным характеристикам типового устройства и силой срабатывания, уменьшенной на 3,1 МН. В результате модифицированное устройство поглощения энергии адаптивно к столкновению с транспортным средством, имеющим конечную жесткость, сравнительно меньшую, чем у железнодорожного подвижного состава. При этом разработанные изменения не оказывают отрицательного влияния на остальные функциональные характеристики крэш-системы: после выполненных конструктивных модификаций перегрузки в вагоне уменьшились от 0,8 до 13,9%, в зависимости от сценария столкновения, а уровень деформаций кузова вагона также остался незначительным.

Перспективы дальнейшего развития данной темы могут быть связаны с разработкой методов оптимизации конструктивных параметров устройств поглощения энергии на базе разработанной методики исследования работоспособности крэш-систем.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций»:

1. Рязанов, Э. М. Моделирование работоспособности крэш-системы электропоезда при аварийных столкновениях / Э. М. Рязанов, М. В. Жуйков, А. Э. Павлюков // Транспорт Урала. – 2014. – № 4 – С. 44-49.

2. Рязанов, Э. М. Повышение эффективности устройств поглощения энергии в системах пассивной безопасности скоростных и высокоскоростных электропоездов / Э. М. Рязанов, Н. Л. Иванов // Транспорт Урала. – 2016. – № 2 – С. 62-68.

Публикации в журналах и научных сборниках:

3. Рязанов, Э. М. Применение устройств поглощения энергии в сцепных устройствах для обеспечения пассивной безопасности электропоездов / Э. М. Рязанов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – №4 – С. 97-100.

4. Рязанов, Э. М. Поэтапный метод исследования нагруженности сварных соединений кузовов вагонов / Э. М. Рязанов // Транспорт Урала: материалы науч. техн. конф., посв. 135-летию Свердловской железной дороги. – 2014. – №1. – С. 34-38.

5. Рязанов, Э. М. Применение комплекса LS-DYNA для анализа нелинейных динамических процессов в железнодорожном подвижном составе при нештатных ситуациях / Э. М. Рязанов, А. Э. Павлюков // Международное научное объединение "Prospero" – 2015 - №1 – С. 50-54.

6. Рязанов, Э. М. Моделирование аварийного столкновения магнитолевитационного транспорта с препятствием / Э. М. Рязанов, А. Э. Павлюков // Электронный научный журнал транспортные системы и технологии. – 2015. – № 1, С. 99–111.

7. Рязанов, Э. М. Численное моделирование аварийного столкновения скоростного электропоезда с автомобилем на железнодорожном переезде / Э. М. Рязанов, А. Э. Павлюков // Проблемы и перспективы развития вагоностроения: материалы VII Всероссийской науч.-практ. конф. – 2016. – С.113-116.

Рязанов Эльдар Михайлович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АВАРИЙНЫХ КРЭШ-СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки)

Подписано в печать 20.03.2017. Заказ № 132

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 1,2. Тираж 100 экз.

Уральский государственный университет путей сообщения

620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.
