

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ**

На правах рукописи

ГОРОБЕЦ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

УДК 629.4.067

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ
ПАССИВНОЙ ЗАЩИТЫ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ ПРИ
АВАРИЙНЫХ СОУДАРЕНИЯХ ПОЕЗДОВ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог и тяга поездов

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научные руководители:
доктор технических наук, профессор
Богомаз Георгий Иванович,
канд. тех. наук, ст. науч. сотр.
Науменко Надежда Ефимовна

Днепропетровск – 2012

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	13
РАЗДЕЛ 1. Обзор литературных источников и существующих конструкций устройств пассивной защиты. Обоснование цели и задач исследования.....	16
1.1. Современные пути решения проблемы обеспечения безопасности пассажиров на железнодорожном транспорте.....	16
1.2. Обзор конструктивных решений по пассивной защите локомотивов и пассажирских вагонов от действия сверхнормативных продольных ударных нагрузок.....	29
1.3. Постановка задачи.....	39
Выводы по разделу 1.....	41
РАЗДЕЛ 2. Разработка научно-методического обеспечения для выбора параметров энергопоглощающих элементов устройств пассивной защиты пассажирских поездов.....	42
2.1. Разработка математической модели соударения пассажирского поезда, экипажи которого оборудованы устройствами пассивной защиты, с препятствием.....	42
2.2. Методика выбора рациональных параметров устройств пассивной защиты для снижения динамической нагруженности единиц подвижного состава пассажирского поезда при сверхнормативных ударных воздействиях.....	53
2.3. Методика лабораторных испытаний энергопоглощающих элементов устройств пассивной защиты вагонов на статическое сжатие с целью исследования процесса их упругопластического деформирования.....	61
Выводы по разделу 2.....	64
РАЗДЕЛ 3. Выбор интегральных характеристик устройств пассивной защиты локомотивов и вагонов пассажирских поездов.....	65

3.1	Оценка динамической нагруженности конструкций пассажирских вагонов локомотивной тяги при столкновении поездов или наезде поезда на препятствие.....	65
3.2.	Исследование динамики пассажирского поезда, оборудованного устройствами пассивной защиты.....	81
3.3	Оценка напряженно-деформированного состояния рам пассажирских вагонов, оборудованных устройствами пассивной защиты.....	90
	Выводы по разделу 3.....	103
	РАЗДЕЛ 4. Выбор рациональных параметров энергопоглощающих элементов устройств пассивной защиты вагонов.....	104
4.1.	Исследование влияния параметров энергопоглощающего элемента в виде усеченной пирамиды на характер его деформирования.....	104
4.2.	Экспериментальные исследования процесса упругопластического деформирования конструкции энергопоглощающего элемента в виде усеченной пирамиды.....	114
4.3.	Исследование влияния параметров энергопоглощающих элементов в виде усеченной пирамиды с инициаторами деформаций на характер их деформирования.....	116
4.4.	Экспериментальные исследования процесса упругопластического деформирования конструкции энергопоглощающего элемента в виде усеченной пирамиды с инициаторами деформаций.....	125
	Выводы по разделу 4.....	132
	РАЗДЕЛ 5. Техничко-экономическое обоснование предлагаемых технических решений.....	134
5.1.	Оценка безопасности пассажиров при аварийных соударениях поездов, вагоны которых оборудованы энергопоглощающими элементами устройств пассивной защиты с выбранными параметрами.....	134
5.2.	Оценка ожидаемого экономического эффекта от использования устройств пассивной защиты.....	136
	Выводы по разделу 5.....	140
	ВЫВОДЫ.....	141

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Акт внедрения результатов исследований, направленных на создание устройств пассивной защиты пассажирских вагонов.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Результаты решения тестовых задач для проверки достоверности используемых моделей.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Результаты расчетов аварийных соударений поезда, оборудованного стандартными средствами продольной амортизации ударов, с препятствиями.....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Результаты расчетов аварийных соударений поезда, оборудованного устройствами пассивной защиты, с препятствиями...	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Исследование влияние параметров на потерю устойчивости конструкции энергопоглощающего элемента в виде усеченной пирамиды.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Силовые характеристики энергопоглощающих элементов в форме усеченной пирамиды, полученные экспериментальным путем.....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – Оценка эффективности энергопоглощающих элементов с выбранными параметрами при их использовании в устройствах пассивной защиты на вагонах пассажирских поездов....	163
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	164

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ЕПС – единицы подвижного состава
МС – междувагонное соединение
НДС – напряженно-деформированное состояние
СА – стандартные амортизаторы
ТС – транспортное средство
УПЗ – устройств пассивной защиты
ЭЭ – энергопоглощающий элемент

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Безусловное обеспечение безопасной перевозки пассажиров и грузов является первейшей и особо важной задачей железнодорожного транспорта. Это положение заложено в основополагающем нормативном документе, регламентирующем всю его работу – «Правилах технічної експлуатації залізниць України».

Анализ аварийных ситуаций при эксплуатации подвижного состава железнодорожного транспорта показал, что в современных условиях весьма остро стоит проблема осуществления железнодорожных перевозок с соблюдением требований по обеспечению безопасности движения. В большинстве случаев причинами нарушений безопасности является человеческий фактор: проезд запрещающих сигналов, невыполнение регламента переговоров, отвлечение от наблюдения за положением стрелочных переводов и пр. Как правило, это приводит к таким аварийным ситуациям как: сход подвижного состава с рельсов, столкновение встречных и попутно следующих поездов, соударение локомотивов между собой, столкновение на станционных путях поездов со стоящими вагонами, наезд поездов на путевые тупиковые упоры. Особую тревогу вызывают ситуации аварийных столкновений с участием пассажирских поездов.

Проведенные многочисленные как натурные, так и теоретические исследования показали, что одним повышением прочности кузовов вагонов проблему безопасности пассажиров решить невозможно, так как вся непогашенная кинетическая энергия столкновения передается на пассажиров и оборудование салона. Поэтому наряду с использованием средств, направленных на предотвращение появления предаварийных ситуаций, например, таких как автоматические системы управления движением транспорта, диагностики, для минимизации человеческих потерь и материальных затрат на ликвидацию последствий аварий на вагонах и локомотивах используются системы пассивной защиты. Поглощение кинетической энергии соударения в этих системах происходит за счет специальных энергопоглощающих элементов большой энергоемкости в процессе необратимого контролируемого упругопластического деформирования их конструкций.

На сегодняшний момент в Украине создана и активно внедряется концепция организации скоростного железнодорожного движения, сформулированная в 2003 и 2009 годах, нацеленная на поэтапное повышение скоростей движения пассажирских поездов до 160-200 км/ч. С учетом повышения скоростей движения, внедрение данной концепции обязательно должно сопровождаться разработкой новых конструкций пассажирских вагонов по специальным техническим требованиям, в том числе по безопасности.

В соответствии с вышеуказанным, создание эффективных средств пассивной защиты пассажирских вагонов и определение их рациональных параметров является актуальной научно-прикладной задачей для железнодорожного транспорта Украины. Следует отметить, что положения данной работы могут быть также распространены на родственные типы подвижного состава, осуществляющие пассажирские перевозки: поезда межрегионального сообщения, а также мотор-вагонный подвижной состав.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Проведенные в диссертационной работе исследования выполнялись в соответствии с планами научно-исследовательских работ ИТМ НАНУ и НКАУ по темам: «Исследование динамической нагруженности машиностроительных и транспортных систем с учетом особенностей упругопластического деформирования их элементов» (№ государственной регистрации 0100U001240); «Математическое моделирование динамической нагруженности конструкций железнодорожного транспорта при эксплуатационных и сверхнормативных воздействиях» (№ государственной регистрации 0105U002521); «Математическое моделирование и исследование динамики железнодорожных экипажей с учетом особенностей работы средств их защиты при ударных нагрузках» (№ государственной регистрации 0108U000342), по которым автор является исполнителем и автором отчетов.

Цель и задачи исследования.

Цель данной работы – усовершенствование системы защиты подвижного состава с целью уменьшения влияния на пассажиров и персонал поезда продоль-

ных сверхнормативных нагрузок в аварийных ситуациях и выбор рациональных параметров защитных конструкций.

Для достижения этой цели поставлены следующие *задачи*:

- провести анализ существующих технических решений по пассивной защите пассажирских вагонов от действия сверхнормативных нагрузок, вызванных аварийными ситуациями, связанными со столкновениями поездов с препятствиями, выполнить выбор типа конструкции и схемы размещения устройств пассивной защиты для отечественных пассажирских вагонов;
- усовершенствовать математическую модель соударения пассажирского поезда с преградой с учетом работы устройств пассивной защиты экипажей;
- провести исследование динамической нагруженности конструкций пассажирских вагонов и локомотива при аварийных столкновениях поезда с препятствием, выбрать интегральные характеристики устройств пассивной защиты;
- разработать конечно-элементную модель для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов железнодорожных вагонов при эксплуатационных и сверхнормативных воздействиях с учетом специфики конкретного типа экипажа и особенностей его нагружения при упругопластическом деформировании и разрушении предложенных элементов защиты и провести оценку схем их размещения;
- определить рациональные значения параметров выбранных конструкций энергопоглощающих элементов устройств пассивной защиты пассажирских вагонов;
- выполнить экспериментальные исследования деформирования энергопоглощающих элементов с выбранными параметрами и сопоставить полученные результаты с данными теоретических исследований.

Объект исследований – процесс динамической нагруженности конструкций вагонов пассажирского поезда, оборудованных устройствами пассивной защиты, при столкновении состава с препятствиями.

Предмет исследований – параметры энергопоглощающих элементов устройств пассивной защиты пассажирского вагона.

Методы исследования. В данной работе использованы такие методы:

- *методы численного интегрирования дифференциальных уравнений* – для исследования динамики поезда при аварийных соударениях;
- *метод конечных элементов* – для оценки напряженно-деформированного состояния конструкции элементов рамы пассажирского вагона и защитных устройств, для анализа уровня критических сил и формы потери устойчивости конструкций защитных устройств, с использованием теории упругости и теории пластичности.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обусловлена корректной математической постановкой задач, использованием современных методов математического моделирования и согласованием полученных результатов теоретических исследований с экспериментальными данными лабораторных испытаний.

Научная новизна полученных результатов:

- впервые определены рациональные параметры конструкций энергопоглощающих элементов коробчатого типа с инициаторами деформаций, которые позволяют устройствам пассивной защиты пассажирских вагонов колеи 1520 мм реализовать необходимую энергоемкость для снижения рисков для жизни и здоровья пассажиров и персонала поезда при аварийных столкновениях;
- усовершенствована математическая модель процесса столкновения пассажирского поезда с препятствием или другим поездом, которая в отличие от существующих учитывает оборудование экипажей поезда устройствами пассивной защиты;
- усовершенствована конечно-элементная модель элементов рамы пассажирского вагона модели 47Д, которая в отличие от существующих учитывает

особенности контролируемой деформации энергопоглощающих элементов пассивной защиты;

– получила дальнейшее развитие методика выбора рациональных параметров устройств пассивной защиты в части поэтапного применения математических моделей различной детализации для последовательного уточнения названных параметров.

Практическое значение полученных результатов состоит:

– в разработке математического и методического обеспечения для исследования динамической нагруженности и напряженно-деформированного состояния элементов конструкций пассажирских вагонов, оборудованных средствами пассивной защиты от продольных сверхнормативных ударов, и выборе рациональных параметров защитных конструкций;

– в разработке рекомендаций по оборудованию устройствами пассивной защиты с энергопоглощающими элементами коробчатого типа пассажирского вагона с отдельными тягово-сцепными приборами;

– в разработке рекомендаций по выбору рациональных параметров энергопоглощающих элементов коробчатого типа, предназначенных для поглощения кинетической энергии удара.

Полученные результаты внедрены на ПАО «Крюковский вагоностроительный завод» в виде рекомендаций по проектированию пассивной защиты для перспективных конструкций пассажирских вагонов.

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты, приведенные в работе, автором получены самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в планировании и проведении теоретических и экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, разработке научных положений и выводов. Автором проведен сравнительный анализ существующих конструкций пассивной защиты пассажирских вагонов, разработана методика по выбору рациональных параметров устройств пассивной защиты, усовершенствована математическая модель для исследования динамической нагруженности экипажей поезда, вагоны которого оборудованы устройствами пассивной защиты, при столкновениях, разработаны конечно-

элементные математические модели для оценки напряженно-деформированного состояния рамы пассажирского вагона и модели для исследования потери устойчивости конструкций энергопоглощающих элементов и выбора рациональных значений их параметров.

В публикациях [1-9], которые написаны в соавторстве и отражают основные результаты диссертации, личный вклад соискателя определяется в следующем. В статье [1] показана необходимость использования дополнительных устройств пассивной защиты на основе анализа динамической нагруженности пассажирских вагонов в условиях аварийных столкновений поездов. В статье [2] с использованием разработанных моделей столкновения поезда, вагоны которого оборудованы пассивной защитой, с преградами определены рациональные значения интегральных параметров устройств защиты. В статьях [3, 4] предложена расчетная схема оборудования рам вагонов устройствами пассивной защиты, выполнена оценка НДС концевой части рамы пассажирского вагона с учетом размещения энергопоглощающих элементов. В статьях [5, 6] определены рациональные значения геометрических параметров конструкции энергопоглощающих элементов в виде усеченной пирамиды. В статьях [7-9] на основе результатов лабораторных испытаний по деформированию предложенных энергопоглощающих элементов при сжимающих нагрузках проведен анализ упругопластического деформирования их конструкций и выполнено уточнение значений их рациональных параметров.

Апробация результатов диссертации. Основные идеи, положения и результаты диссертационной работы представлены и обсуждены на конференциях «Проблемы механики железнодорожного транспорта: безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава, энергосбережение» (г. Днепропетровск, 2004 и 2008 г.); на научно-практических конференциях «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління» (г. Киев, 2005, 2008 и 2011 г.); на международных научно-практических конференциях «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (г. Днепропетровск, 2005 и 2010 г.); на II научно-практической конференции «Внедрение наукоемких технологий на магистральном и промышленном транспорте» (г. Алушта, 2006 г.); на международной научно-практической конферен-

ции «Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій» памяти академика НАН Украины В. И. Моссаковского (г. Днепропетровск, 2007 г.), а также на международной научно-практической конференции «Информационные технологии управления сложными системами» (г. Днепропетровск, 2008 г.). Диссертационная работа в полном объеме докладывалась 14.03.2012 на заседании научного семинара отдела «Динамика многомерных механических систем» ИТМ НАНУ и НКАУ, 7.06.2012 на ученом совете ИТМ НАНУ и НКАУ и 24.10.2012 на межкафедральном научном семинаре ДНУЖТ (ДИИТ).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 22 научные работы, в том числе: 9 статей в изданиях, входящих в Перечень специализированных научных изданий Украины, 13 тезисов докладов на международных научно-технических конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованных источников и приложений. Основной текст диссертации изложен на 142 страницах включая 4 таблицы из которых одна таблица размещена на отдельной странице, 82 рисунка из которых 36 рисунков размещены на 24 отдельных страницах, список использованных источников из 101 элемента – на 10 страницах и 7 приложений на 21 странице. Полный объем диссертации составляет 173 страницы.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В диссертационной работе применены следующие термины с соответствующими определениями [10].

Авария — опасное техногенное происшествие, создающее на объекте, определённой территории, угрозу жизни и здоровью людей и приводящее к разрушению зданий, сооружений, оборудования и транспортных средств (ТС), нарушению производственного или транспортного процесса, а также к нанесению ущерба окружающей природной среде.

Аварийное соударение (ТС с препятствием) – соударение, при котором режим работы транспортного средства переходит из эксплуатационного в аварийный.

Препятствие – материальный объект на пути следования ТС, соприкосновение с которым может вызвать какие-либо повреждения ТС и повлечь нежелательные последствия, представляющие угрозу жизни и здоровью пассажиров и обслуживающего персонала.

Активная защита — совокупность организационных мер и технических решений, направленных на предотвращение аварийного происшествия и исключение предпосылок их возникновения.

Пассивная защита — это совокупность устройств и технических решений, направленных на снижение тяжести последствий аварийного происшествия.

Эксплуатационный режим работы транспортного средства – режим работы ТС, который предусмотрен техническими требованиями по эксплуатации.

Аварийный режим работы транспортного средства – режим работы транспортного средства, при котором его работа не соответствует требованиям эксплуатации и безопасности. Для соблюдения требованиям безопасности пассажиров в этом режиме работы используют устройства пассивной защиты.

Аварийный сценарий столкновения – совокупность условий, характеризующих аварийное столкновение (масса препятствия, начальная скорость движения ТС и препятствия, взаимное их положение и др.).

Устройство пассивной защиты (УПЗ) – техническое устройство для обеспечения пассивной защиты ТС, выполненное в виде отдельного, заменяемого блока.

Энергопоглощающий элемент (ЭЭ) пассивной защиты – элемент УПЗ (или конструкции), выполняющий необратимое преобразование кинетической энергии удара в другие ее формы.

Инициатор деформации ЭЭ – часть ЭЭ, изменяющая его характеристики таким образом, чтобы можно было добиться требуемой формы потери его устойчивости.

Жертвенный элемент – элемент несущей конструкции ТС, который в аварийном режиме работы разрушается при заданной нагрузке.

Жертвенная зона – часть конструкции ТС, которая в процессе аварийного соударения ТС с препятствием получает остаточную деформацию.

Пространство выживания – часть кабины и салона ТС, которая после аварийного столкновения сохраняет свой объем для выживания пассажиров и обслуживающего персонала.

Интегральные характеристики УПЗ – набор параметров, определяющий свойства устройств пассивной защиты.

Интегральные параметры УПЗ – параметры, используемые для определения интегральных характеристик УПЗ.

Требования безопасности – набор условий, определяющих допустимые значения показателей безопасности ТС, характеризующих множество состояний ТС с точки зрения безопасности для человека.

Показатели безопасности – набор контролируемых параметров (сил, ускорений, пластических деформаций и т.д.) для определения уровня защиты ТС.

Максимально допустимые значения показателей безопасности – значения, превышение которых приводит к нарушению выбранных требований безопасности.

Критическая сила деформируемого элемента – сила, при которой происходит потеря устойчивости конструкции деформируемого элемента.

Критическая скорость соударения – показатель уровня защиты поезда, определяющий максимальное значение скорости соударения для определенного сценария аварийного соударения, при котором не происходит нарушение принятых требований безопасности.

Значение силы срабатывания УПЗ – значение силы, приходящейся на УПЗ, при превышении которого происходят необратимые изменения конструктивных элементов ТС и режим работы ТС переходит из эксплуатационного в аварийный.