

М П С С С Р

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
имени М.И. Калинина

На правах рукописи

УДК: ~~629.04.067~~

656.2.08

ИВАНОВ Анатолий Владимирович

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПассажиРОВ ПРИ
АВАРИЙНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ

(05.22.07 - ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА ПОЕЗДОВ)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск, 1981

НТБ
ДНУЖТ

И П С С С С Р

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
имени М.И. Калинина

На правах рукописи

УДК: 629.04.067

ИВАНОВ Анатолий Владимирович

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПассажиРОВ ПРИ
АВАРИЙНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ
(05.22.07 - подвижной состав и тяга поездов)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск, 1981

НТБ
ДНУЖТ

6652 а

4/8/81

Работа выполнена в Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени институте инженеров железнодорожного транспорта им. М.И.Калинина и во Всесоюзном научно-исследовательском институте вагоностроения

Научные руководители

Заслуженный деятель науки УССР, академик АН УССР **В.А.ЛАЗАРЯН**

Заслуженный работник Высшей школы УССР, доктор технических наук, профессор **Е.П.БЛОХИН**

Официальные оппоненты

Доктор технических наук, профессор **Н.Н.ОВЕЧНИКОВ**

Кандидат технических наук **Г.В.КОСТИН**

Ведущее предприятие

Главное управление локомотивного хозяйства МПС

Защита диссертации состоится 14 01 1982г. в ___ час. на заседании Специализированного совета К.И4.07.01 при Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени институте инженеров железнодорожного транспорта им. М.И. Калинина по адресу : 320629, ГСП, 2 Днепропетровск, ул. им. акад.Лазаряна, 2, ДИИТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан 12 сентября 1981 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес Совета института.

Ученый секретарь Специализированного совета К.И4.07.01

Кандидат технических наук, доцент

Днепропетровский
институт инженеров
жел. до транспорта

И.В. ПЕТРОВИЧ

ДУБЛЕТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

А к т у а л ь н о с т ь . Обеспечение безопасности пассажиров является одним из важных требований, которое предъявляется к конструкциям пассажирского подвижного состава.

Анализ опыта эксплуатации серийных электропоездов (ЭР-1 и ЭР-2 первого выпуска) и документов архива МПС определил необходимость исследований, направленных на повышение безопасности пассажиров при аварийных столкновениях электропоездов.

Л.И.Брежнев в своей речи на XVI съезде профсоюзов СССР отметил, что настало время переходить "от техники безопасности к безопасной технике".

Диссертационная работа представляет собой выполненную автором часть исследований, проведенных Всесоюзным научно-исследовательским институтом вагоностроения (ВНИИВ), его Рижским филиалом и Рижским вагонзаводом (РВЗ) совместно с Днепропетровским институтом инженеров железнодорожного транспорта (ДИИТ), Днепропетровским отделением института механики (ДОИМ) АН УССР и Всесоюзным научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) с целью создания "Норм..." для расчета на прочность электропоездов пригородного сообщения.

Ц е л ь и с с л е д о в а н и я . Разработать принципы совершенствования и расчетные нормативы прочности электровагонов, рассматривая сохранение целостности кузовов (особенно пассажир-

ских помещений) при аварийных столкновениях как необходимую меру обеспечения безопасности, не допуская при этом перегрузок, опасных для пассажиров.

М е т о д и к е и с с л е д о в а н и я. Исследования выполнены с использованием методов математического моделирования нелинейных задач динамики одномерных многомассовых систем, современных средств измерений и включают натурную имитацию столкновения электропоездов, моделирование на АВМ процесса их соударения и прочностные расчеты на ЭЦВМ.

Решение поставленной цели включает:

- отработку методики экспериментальной проверки защитных свойств электровагонов при столкновениях;
- исследование прочностных свойств и деформаций кузовов электровагонов при статическом сжатии продольными силами;
- исследование прочностных и защитных свойств электровагонов и силового воздействия на них при маневровых и аварийных соударениях, а также перегрузок, действующих при этом на пассажиров;
- разработку аналоговой модели процесса соударения электропоездов;
- исследование влияния на процесс соударения электропоездов отдельных параметров электровагонов;
- конструктивную отработку защитных свойств электровагонов;
- разработку расчетных нормативов прочности кузовов электровагонов.

Результаты теоретических исследований сопоставлялись с результатами натуральных экспериментов.

Основные выводы исследований проверены на специально построенных Рижским вагонозаводом натуральных образцах электровагонов.

Н а у ч н ы е н о в и з н е:

1. Изучены прочностные и защитные свойства и установлены

типовые зоны разрушений кузова электровагонов при аварийных соударениях. Предложен обобщенный показатель защитных свойств электровагонов.

2. Разработаны новые принципы совершенствования конструкций электровагонов, главным из которых является повышение их энергоемкости за счет более полного использования пластических деформаций металлоконструкции кузова путем повышения степени равнопрочности несущих продольных элементов вдоль его рамы.

3. Впервые исследован процесс соударения составов электропоездов при аварийных скоростях соударений (до 7 м/с). В результате теоретически получены и экспериментально подтверждены закономерности распределения вдоль кузова электровагона и состава электропоезда продольных сил, ускорений и деформаций при реальных и задаваемых параметрах конструкции электровагонов.

4. Впервые при соударениях вплоть до разрушения непосредственно измерена динамическая жесткость кузова электровагона.

Получены данные о продольной жесткости различных типов кузовов электровагонов в упругой и упруго-пластической стадиях деформирования при статическом сжатии продольными силами.

5. Теоретически обоснована, разработана (а.с. №279691, СССР) и исследована в лабораторных и натуральных условиях конструкция антаварийного устройства для головных электровагонов.

П р а к т и ч е с к а я ц е н н о с т ь :

1. Основные результаты исследований включены в "Нормы для расчетов на прочность при проектировании механической части вагонов электропоездов пригородного сообщения для железных дорог МПС колеи 1520 мм", утвержденные Минтяжмаш и МПС в 1976 году.

Обоснованы: дополнительный расчетный режим прочности кузовов электровагонов при их проектировании - "условный режим безопас-

ности" и условия проверки защитных свойств вновь построенных электровагонов.

2. Разработанные при участии автора изменения конструкций кузовов электровагонов внедрены Калининским и Рижским вагонзаводами на электропоездах ЭР-2 и ЭР-9П (выпуска с 1967 года), ЭР-2Р, ЭР-9М, ЭР-22М, ЭР-22В, ЭР-25 (для Народной Республики Болгарии), ЭР-31 (для Социалистической Федеративной Республики Югославии) и на скоростном электропоезде ЭР-200. Экономический эффект от внедрения электропоездов указанных серий составил 20,52 млн.руб. долевое участие от внедрения результатов исследований - 500 тыс.руб.

3. МПС выданы Минтяжмаш заявки на разработку двух типов электропоездов (ЭР-29 и ЭР-30). В технические условия на эти электропоезда включены рекомендованные автором требования, вытекающие из диссертационной работы.

А п р о б а ц и я. Основные положения диссертации доложены:

1. На I Республиканской конференции молодых ученых-железнодорожников, г.Днепропетровск, 1969.

2. На III Всесоюзной научно-технической конференции по применению ЭВМ при проектировании, испытании и эксплуатации электропоездов, г.Рига, 1969.

3. На заседании семинаре по механике Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, 1976.

4. На Всесоюзной конференции "Проблемы механики наземного транспорта", г.Днепропетровск, 1977.

5. На научно-технической конференции "Основные направления и задачи научно-исследовательских работ по обеспечению прочности и динамических качеств перспективных тепловозов", г.Коломна, 1977.

6. На ИТС сектора "Динамика и прочность локомотивов и моторвагонного подвижного состава" отделения "Тепловозы и локомотивное хозяйство" ВНИИЖТ, 1981.

П у б л и к а ц и я. Материалы диссертации получены при выполнении 10 научно-исследовательских работ, изложены в отчетах ВНИИВ и опубликованы в 7 статьях.

С т р у к т у р а и о б ъ е м. Диссертация состоит из семи разделов, литературы и приложений.

Работа изложена на 200 стр., включая 108 стр. машинописного текста, 60 рисунков, 13 таблиц, списка литературы из 117 наименований и семи приложений.

В первом разделе показана актуальность проблемы и практическая направленность исследований.

Во втором разделе рассмотрен в свете решаемой проблемы парк электропоездов и сделан обзор экспериментальных и теоретических исследований по динамике поезда и взаимодействию железнодорожных экипажей при соударениях.

В третьем разделе излагается общая постановка задачи и методика экспериментальных и теоретических исследований.

В четвертом разделе проведен анализ результатов экспериментальных исследований прочностных и защитных свойств головных электровагонов серийных электропоездов ЭР-1 и ЭР-2, опытной партии электропоездов ЭР-22 и специально построенного для исследовательских целей кузова ЭР-23 из алюминиевых сплавов.

В пятом разделе изложены и проанализированы результаты теоретических исследований процесса соударения электропоездов с реальными и задаваемыми конструктивными параметрами электровагонов: только при упругих деформациях кузовов электровагонов (условно изготовленных из высокопрочных сталей); при упруго-пластических деформациях кузовов электровагонов; при оборудовании головного электровагона антивазридным амортизатором с варьируемыми параметрами.

Шестой раздел посвящен изложению принципов совершенства-

ния конструкций электровагонов и при выработке нормативных требований к прочности их кузовов.

В седьмом разделе сформулированы выводы, даны рекомендации по совершенствованию конструкций электровагонов и расчету на прочность их кузовов, а также сделано заключение о практическом применении результатов исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Безопасность пассажиров электропоездов при аварийных столкновениях определяется защитными свойствами конструкции электровагонов.

Применение конструктивных мер, направленных на увеличение защитных свойств электровагонов, выбранных из условия обеспечения полной безопасности пассажиров в пределах скорости соударения существенно меньше, чем конструкционная, позволяет уменьшить последствия столкновения во всем диапазоне скоростей аварийных столкновений.

Согласно "Правила технической эксплуатации железных дорог СССР" скорость 5,55 м/с (20 км/ч) является предельно допустимой для случая движения поезда на красный сигнал светофора (при въезде на возможно занятый участок пути). Исходя из этих реальных предпосылок, в исследовании относительная скорость соударения 5,55 м/с (20 км/ч) принята в качестве контрольной "безопасной" скорости, при которой оцениваются защитные свойства электровагонов.

В отечественных и зарубежных литературных источниках вопросу обеспечения безопасности пассажиров при аварийных столкновениях железнодорожных экипажей посвящено очень небольшое число публикаций, носящих, в основном, опосредственный характер.

ВНИИВ, ВНИИЖТ, ВНИТИ, ВИТИМ, МИИТ постоянно ведут исследования по динамике поездов и взаимодействию железнодорожных экипажей при маневровых соударениях. В теоретических и экспериментальных исследованиях специалистов этих организаций (Аксенов Н.С., Бесполов Н.Р., Блохина Е.П., Бодянова П.С., Вершинского С.В., Каблукова В.А., Кривизгура Г.Б., Костина Г.В., Кузьмича Л.Д., Лазаряна В.А., Манашкина Л.А., Никольского Е.Н., Никольского Л.П., Понькина Н.А., Пузынькова А.Д., Солодкова С.П., Хусидова В.Д., Щуров А.И., Юрченко А.В. и др.) остался не рассмотренным ряд необходимых для осуществления поставленной в работе цели вопросов:

- прочностные и защитные свойства электровагонов существующих конструкций при аварийных соударениях;

- уровень величин и характер изменений продольных сил как по длине электропоезда, так и вдоль кузова электровагона, при аварийных столкновениях составов;

- влияние на процесс соударения параметров конструкции железнодорожного экипажа при более высоких, чем изученные ранее (до 3,3 м/с), скоростях аварийных столкновений составов применительно к конструктивным особенностям электропоездов.

Для обеспечения решения отмеченных вопросов в диссертации рассмотрены некоторые вопросы методического характера.

Уточнена методика проверки экспериментальным путем защитных свойств электровагонов; такая проверка должна производиться не соударением одиночных электровагонов со скоростями до 2,8 м/с, как это делалось раньше, а при наезде электропоезда с контрольной скоростью 5,55 м/с на стоящий заторможенный грузовой состав. Практическими критериями безопасности пассажиров следует считать: отсутствие деформаций несущих элементов кузовов, вызывающих его разрушение и угрожающих жизни пассажиров; сохранность креплений внутреннего оборудования и пассажирских диванов; перегрузки, дей-

ствующие на пассажиров, в пределах 4 г *.

Разработан способ замера продольной деформации кузова, пригодный и при статическом сжатии, и при испытаниях на соударение. По центральному проходу пассажирского салона прокладывается металлическая труба, которая опирается на расставленные с интервалом ролики, благодаря чему она может при деформациях перемещаться относительно пола кузова. Один конец этой трубы приваривается к лобовой стойке кузова, а во втором размещается датчик перемещения, соединенный с концевой балкой рамы кузова. Впервые экспериментально получены величины продольной жесткости: кузова ЭР-2 при статическом сжатии в упругой зоне деформирования (170 мН/м) и его концевой длиной 4,4 м (2000 мН/м) и средней длиной 8,6 м (400 мН/м) частей; кузова ЭР-22 при статическом сжатии в упругой зоне деформирования (140 мН/м) и при соударении (в упругой зоне деформирования 288,5 - 344,8 мН/м, а в упруго-пластической 16,7-18,3 мН/м).

Изучено напряженное состояние кузовов электровагонов существующих конструкций: в основных узлах и сечениях при ударном воздействии продольных сил и более подробно при статическом сжатии. Установлено, что гофрированная обшивка с увеличением продольной нагрузки в результате выгиба из плоскости нелинейно участвует в ее восприятии. Несущая способность кузовов электровагонов, в основном, определяется продольными элементами рамы. Характер напряженного состояния рам кузовов серийных электровагонов свидетельствует о значительной их неравнопрочности по длине и наличии локальных зон повышенных напряжений. Именно эти зоны при соударении в первую очередь подвержены остаточному деформированию и раз-

ж) Согласно данным медицинских исследований допустимая величина перегрузки принята в соответствии с продолжительностью ее действия (основная фаза процесса удара длится $\approx 0,1$ с).

рушению, что не позволяет рационально использовать потенциальные возможности остальной части конструкции.

Испытаниями головных электровагонов на соударение до разрушения, приведенными при участии и под руководством автора на экспериментальном кольце ВНИИКТ, установлено, что защитные свойства электровагонов серийных электропоездов ЭР-1 и ЭР-2 (до усиления конструкции кузова) и опытной партии электропоездов ЭР-22 соответствуют низким "безопасным" скоростям соударений. Исследование защитных свойств проводились путем столкновения составов массой около 600 т каждый. Один состав, состоящий из груженных полувагонов, был заторможен. Другой, состоящий из испытуемого электровагона, расположенного в голове сцепе груженных полувагонов, накатывался на первый. Схема загрузки электровагона имитировала распределение масс при полной его населенности.

Натурными испытаниями электровагонов выявлен ряд важных качественных и количественных характеристик процесса соударения (возникающие продольные силы и ускорения, величины разрушающего кузов усилия, величины динамической жесткости кузова в упругой и упруго-пластической стадиях его деформирования и др.). Однако последние ограничены типом конкретной конструкции, так как варьирование параметров в натуральных образцах не только экономически нецелесообразно, но в ряде случаев невозможно. Для изучения влияния варьируемых параметров электровагонов на уровень продольных сил проведены теоретические исследования процесса соударения составов методом математического моделирования на АЭМ (модели МПТ-9 и ЭМУ-10, дополненные специально разработанными к ним приставками). При этом был использован опыт применения электромеханических аналогий к задачам динамики поезда, накопленный в Дяспропетровской школе (В.А.Лазарян, Е.П.Блохин, Л.А.Манашкин и др.).

Расчетная схема состава электропоезда принята в виде систе-

мы деформируемых тел (электровагонов), связанных упруго-диссипативными соединениями. При этом рассеяние энергии определялось сухим трением на стадии работы фрикционных поглощающих аппаратов, пластическим деформированием с образованием остаточных деформаций в случаях, когда нагрузка превышает усилие, соответствующее пределу упругости конструкции кузова, сжатие без отдачи специального антиаварийного амортизатора, когда нагрузка превышала усилие его предварительной затяжки. Сами электровагоны в одних случаях заменялись одной сосредоточенной массой, а в других - несколькими (кузов - четырьмя массами, каждая из тележек - одной массой).

Движение механической системы описывалось дифференциальными уравнениями типа:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= v_i - v_{i+1} & i = 1, \overline{n-1} \\ \dot{v}_i &= m_i^{-1} (S_{i-1} - S_i - \kappa_{ij} S_{Tj}) & i = 1, \overline{n} \\ \dot{\delta}_{Tj} &= v_j - v_{Tj} & j = 1, 4 \\ \dot{v}_{Tj} &= m_{Tj}^{-1} S_{Tj} & j = 1, 4 \end{aligned}$$

при граничных условиях $\dot{\delta}_0 = V - 2v_1$, $S_n = 0$, где δ_i - сжатие i -той связи между массами; δ_0 - сжатие связи между первыми электровагонами соударяющихся составов; v_i - скорость перемещения i -той массы; V - относительная скорость составов перед соударением; m_i - масса электровагона или его части; m_{Tj} - масса тележки, соединенная с телом $i=j$ одномерной системы; S_i - продольное усилие в i -той связи; зависимость $S(\delta, \dot{\delta})$ задавалась кусочно-линейной характеристикой, описывающей работу типовых поглощающих аппаратов, упругие и пластические деформации кузова, а также работу антиаварийного амортизатора; S_{Tj} - продольное усилие в соединении тележки с телом $i=j$; v_{Tj} - скорость перемещения тележки; κ_{ij} - сим-

вол Кронекера (если $\epsilon \neq j$ то $A = 0$; если $\epsilon = j$ то $A = I$); $n-3$ - количество электровагонов в составе.

Решение дифференциальных уравнений движения механической системы производилось с помощью АЭМ. С участием автора была разработана электронная схема, использующая меньшее, чем прежде количество усилителей и интеграторов для моделирования характеристики соединения между массами. Это позволило решать дифференциальные уравнения движения механической системы при замене головного электровагона несколькими сосредоточенными массами.

В результате многовариантных расчетов, качественно и количественно оценено влияние на уровень продольных сил отдельных конструктивных параметров электровагонов: способности кузовов к пластическому деформированию, характеристик поглощающих аппаратов и основных параметров антиварийного амортизатора.

Установлен характер распределения продольного усилия вдоль кузова головного вагона для случаев соударения электропоезда и случая соударения состава, состоящего из головного электровагона и полувагонов, которых имитировался электропоезд при эксперименте. Данные табл. I показывают не только качественное, но и удовлетворительное количественное совпадение теоретических и экспериментальных значений для идентичных составов.

Если экспериментальными исследованиями, в основном, установлены границы безопасного соударения существующих электровагонов и ожидаемые последствия от аварийных соударений, то теоретические исследования позволили определить, какие свойства надо придать электровагонам, чтобы они обеспечивали безопасность пассажиров при аварийных соударениях с заданной контрольной скоростью.

Выполненные исследования показали, что для безопасного аварийного соударения составов с относительной скоростью 5,55 м/с

Таблица I

Величины продольных сил в сечениях кузова электровагона
ЭР-22 при соударении составов со скоростью 3,3 м/с, Мн

Данные	Состав	Сечения механической системы				
		0	I	2	3	4
Теоретическое	электропоезд	3,20	2,65	2,60	2,50	2,75
Теоретические	имитирующий	3,25	2,60	2,50	2,25	3,10
Экспериментальные	имитирующий	3,35	2,75	2,65	2,35	3,35

головной электровагон типа ЭР-22 должен обладать энергоемкостью: 700-750 кДж, отнесенной к головной части, и 200 кДж отнесенной к хвостовой части; энергоемкость прицепного электровагона должна составлять 400 кДж, при создаваемом в процессе соударения максимальном продольном усилии, не превышающем 3,5 Мн.

Существовали две точки зрения относительно улучшения защитных свойств электровагонов. Одна из них связана с повышением прочности несущей конструкции кузова до уровня возникающих при соударениях продольных сил. Другая - со снижением величин возникающих продольных сил до уровня, соответствующего прочности несущей конструкции кузова.

В диссертации показано, что увеличение прочности кузовов до уровня, обеспечивающего восприятие продольных усилий при скоростях соударений до 5,55 м/с в зоне только упругих деформаций, вызывает рост уровня возникающих при этом продольных сил до 6,0-7,0 Мн. Это соответственно приводит к недопустимо большим перегрузкам, действующим на пассажиров (до 10 g при допустимой

величина 4,0 g).

Таким образом, обеспечение целостности пассажирских помещений при соударениях путем повышения прочности не решает главной задачи-обеспечения безопасности пассажиров, одним из важных условий которой является низкий уровень перегрузок (продольных сил).

Изучению путей снижения продольных сил в диссертации уделено основное внимание.

Исследования процесса соударения электропоездов с учетом реальных характеристик жесткости кузовов, полученных автором, показали, что при работе конструкции не только в упругой, но и пластической зоне деформирования, уровень продольных сил значительно ниже, чем у высокопрочных (условно) конструкций. Так, для кузова электровагона типа ЭР-22 при жесткости в упругой стадии 140 МН/м и пластической- 8 МН/м уровень продольных сил при соударении со скоростью 5,55 м/с составляет 4,05 МН.

Таким образом, поиск путей дальнейшего снижения уровня продольных сил следует вести с учетом пластической зоны деформирования кузовов электровагонов.

Теоретическими исследованиями, проведенными автором в этом направлении, было установлено, что обобщенным показателем защитных свойств электровагонов, определяющим уровень продольных сил, является суммарная энергоемкость соударяющихся экипажей, отнесенная к соответствующему уровню продольных сил.

Учитывая, что случаи аварийных столкновений электропоездов редки, а для конкретного электровагона участие в соударении не более чем единично, целесообразно использовать в аварийных ситуациях способность конструкции к пластическому деформированию в разумных пределах, не приводящих к потере устойчивости и несущей способности кузова. Исходя из этого, в диссертации даны рекомендации по

совершенствованию конструкции. Если катодик тем, что наряду с обеспечением прочности необходимо стремиться к увеличению их энергоемкости за счет рассеивания энергии удара при пластическом деформировании металлоконструкции кузова. Дополнительное увеличение энергоемкости электровагонов следует осуществлять применением поглощающих аппаратов с увеличенной энергоемкостью, а для головных электровагонов постановкой специальных антиаварийных амортизаторов.

Конструктивно более полное использование пластических деформаций металлоконструкции может быть достигнуто устранением зон повышенных напряжений рам кузовов, выявленных автором при экспериментальных исследованиях, обеспечением на стадии проектирования новых конструкций более высокой степени равнопрочности и применением для изготовления кузовов более пластичных, чем сталь, алюминиевых сплавов.

Для предварительной оценки защитных свойств электровагонов по результатам статических испытаний предложен ряд расчетных показателей. Коэффициент равнопрочности в упругой стадии деформирования кузова $\beta_y = \frac{\sum \sigma_i l_i}{\sigma_{max} \sum l_i}$, где σ_i - величины напряжений в продольном элементе рамы кузова, l_i - длина этого элемента, σ_{max} - величина максимального напряжения по всей длине рамы. Коэффициент равнопрочности в упруго-пластической стадии деформирования $\beta_n = \frac{\sum [(\sigma_i \sigma_i / \sigma_{max}) - \sigma_T] l_i}{\sigma_b \sum l_i}$, где σ_b - предел прочности, а σ_T - предел текучести материала рамы кузова. Величина упругой $\delta_y = (\sigma_T \sum l_i / E) \beta_y$ и допустимой пластической $\delta_n = \gamma \cdot \sum l_i \beta_n$ деформации, где E - модуль упругости материала рамы кузова, а γ - коэффициент, который для стальных рам принимается равным 0,01, для алюминиевых - 0,02. Значения коэффициента γ получены автором экспериментально при сжатии до разрушения образцов продольных

балок рам кузовов электровагонов ЭР-2, ЭР-22м, ЭР-23. Усилие, соответствующее началу пластических деформаций в раме кузова $S_n = (\sigma_T / \sigma_{Tmax}) S_u$, где S_u - испытательное усилие. Усилие, соответствующее разрушению кузова $S_p = (\sigma_b / \sigma_{bmax}) S_n$. Продольная жесткость кузова в упругой $K_y = S_n / \delta_y$ и пластической $K_n = (S_p - S_n) / \delta_n$ стадиях деформирования. Энергоемкость электровагона $\mathcal{E}_z = \mathcal{E}_y^f + \mathcal{E}_n^f + \mathcal{E}_a$, где $\mathcal{E}_y^f = 0,5 S_n \delta_y$ и $\mathcal{E}_n^f = 0,5 (S_n + S_p) \delta_n$ величины энергоемкости за счет упругих и пластических деформаций кузова, а \mathcal{E}_a - энергоемкость двух поглощающих аппаратов. "Безопасная" скорость соударения $[V] = \sqrt{4 \mathcal{E}_z / m}$, где m - масса электровагона. Значения расчетных показателей для испытанных электровагонов приведены в табл. 2. Они позволили сопоставить разные конструкции между собой и заключить, что проведенное при участии автора конструктивное совершенствование существующих электровагонов увеличило их энергоемкость \mathcal{E}_z с 46 кДж (ЭР-2 первого выпуска) до 612 кДж (ЭР-22В). Соответственно "безопасная" скорость соударения $[V]$ увеличилась с 1,75 м/с до 5,3 м/с. Применение в конструкции специально изготовленного для исследований кузова электровагона ЭР-23 алюминиевых сплавов позволило увеличить \mathcal{E}_z до 1440 кДж и $[V]$ до 8,1 м/с. Экспериментальной проверкой его защитных свойств (при скорости соударения 5,7 м/с сохранилась целостность кузова) подтверждена правильность выбранного принципа совершенствования конструкций электровагонов.

Несмотря на ряд положительных факторов, применение алюминиевых сплавов для изготовления кузовов электровагонов, к сожалению, связано с трудностью обеспечения умеренной прочности (с целью не вызывать чрезмерных перегрузок, действующих на пассажиров) с достаточной его изгибной жесткостью. Поэтому оставалась весьма актуальной задача поиска путем дальнейшего повышения защитных свойств

Таблица 2.

Расчетные параметры, характеризующие защитные свойства существующих
серий электровагонов

Серия электро- вагонов	β_y	δ_y см	S_n МН	κ_y МН/м	β_n	δ_n см	S_p МН	κ_n МН/м	\mathcal{E}_z кДж	$[V]$ м/с
ЭР-2 (1962 г.)	0,42	0,8	1,2	150	0,04	1,08	1,9	65	46	1,75
ЭР-22	0,56	1,4	1,7	121	0,05	1,83	2,5	44	75	1,85
ЭР-2 (1967 г.)	0,75	1,4	2,3	164	0,2	3,86	3,7	36	157	3,2
ЭР-22М	0,31	2,0	2,8	136	0,39	9,1	4,4	17	380	4,2
ЭР-22В	0,86	2,1	3,3	157	0,67	14,4	5,2	13	612	5,3
ЭР-23	0,88	4,2	3,0	71	0,75	32,0	6,0	9,4	1440	8,1

электровагонов со стальными кузовами.

К характерным особенностям теоретически и экспериментально установленных закономерностей распределения продольных сил по длине электропоезда и вдоль кузова головного электровагона относится то, что наиболее нагруженными является головной электровагон, испытывающий продольные силы ($V = 5,55$ м/с, $S_0 = 4,05$ МН) примерно в 1,3 раза превышающие их уровень в остальной части состава ($S_{1/n-1} = 3,0-3,2$ МН), и что повышенные продольные силы, в основном, возникают только в его головной части. Поэтому достаточно снизить уровень продольных сил в головной части, чтобы повысить защитные свойства головного электровагона в целом.

Теоретические исследования, проведенные в этом направлении, показали, что установка антиаварийного амортизатора на головные электровагоны позволяет снизить уровень продольных сил в месте стыке соударяющихся составов. Так, при $V = 5,55$ м/с антиаварийный амортизатор с энергоемкостью $\mathcal{E}_A = 450-500$ кДж снижает максимальные продольные силы, действующие на электровагон типа ЭР-22, с 4,05 МН до 3,5 МН.

При увеличении \mathcal{E}_A можно добиться одинакового силового воздействия на все электровагоны состава. Это целесообразно с точки зрения технологии и экономичности производства электровагонов. Кроме этого, установка антиаварийного амортизатора с малым усилием срабатывания (1,5-2,0 МН) позволяет увеличить энергоемкость соударяющихся электровагонов при низких уровнях продольных сил, что обеспечит малые перегрузки, действующие на пассажиров, а при соударении с менее прочными существующими электровагонами будет способствовать увеличению безопасности пассажиров в них.

Испытаниями четырехвагонной секции электропоезда ЭР-10, оборудованной опытным образцом антиаварийного устройства, экспериментально подтверждены результаты, полученные при теоретических ис-

следованиях. Прегрузки, действующей на пассажиров, снижены в 2,7 раза.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Испытаниями впервые проведенными при скоростях соударения до 5,7 м/с установлены защитные свойства головных электровагонов серийных электропоездов ЭР-1 и ЭР-2 (первого выпуска) и опытной партии электропоездов ЭР-22.

2. Защитные свойства электровагонов определяются не только величиной расчетной продольной силы, в большей мере они характеризуются суммарной энергоемкостью конструкции при уровне продольной силы, равной разрушающему кузов усилию. Суммарная энергоемкость складывается из величин энергии, затрачиваемых на сжатие поглощающих устройств и деформирование конструкции кузова в упругой и пластической стадиях

3. С целью обеспечения электровагона защитными свойствами при прочностных расчетах на стадии проектирования, кроме применяемого режима нормальной эксплуатации, дополнительно предложен специальный режим - "условный режим безопасности" и ряд соответствующих нормативных требований, которые включены в "Нормы для расчетов на прочность при проектировании механической части вагонов электропоездов пригородного сообщения для железных дорог МПС колес 1520 мм", утвержденные МИНТРАМАС и МПС в 1976 году (п.п. 2.14; 4.5; 4.13 и табл. 2.14).

4. Предложены принципы совершенствования конструкций электровагонов, состоящие в следующем: соблюдая условия прочности, необходимо стремиться к увеличению энергоемкости электровагона; последнее достигается устранением зон повышенных напряжений рамы кузовов, обеспечением более высокой, чем у существующих конструк-

ции, степени равнопрочности по их длине, а также применением для изготовления кузовов более пластичных, чем сталь, алюминиевых сплавов, а также установкой на головных электровагонах антиаварийных амортизаторов, а на остальных - поглощающих аппаратов увеличенной энергоемкости.

5. При одинаковых защитных свойствах электровагонов состава постанова антиаварийного амортизатора позволяет увеличить "безопасную" скорость соударения. Для повышения "безопасной" скорости соударения электровагона ЭР-22 до контрольной величины, равной 5,55 м/с, энергоемкость антиаварийного амортизатора должна составлять 730 кДж.

6. Разработанные при участии автора изменения конструкций кузовов, повышающие защитные свойства электровагонов, внедрены Калининским и Рижским вагонзаводами. Долевое участие от внедрения результатов исследования составляет 500 тыс.руб.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Иванов А.В. Исследование по выбору рациональных параметров конструкции вагонов электропоезда при восприятии аварийных ударных нагрузок. - науч.тр.ВНИИ. Вып. II, 1970, с. 43-61.
2. Иванов А.В., Козлов Э.С., Тушев В.И. Исследование распределения продольных усилий по длине первого вагона состава электропоезда при соударениях. - Науч.тр.ДИИТ. Вып. 145, 1973, с.32-38.
3. Иванов А.В., Солодков С.П. Применение антиаварийных амортизирующих устройств в электропоездах. - Вестник ВНИИ ж.-д. транспорта, 1976, № I, с.31-35.
4. Иванов А.В. К вопросу защиты кузовов железнодорожных экипажей от разрушения при действии аварийных продольных нагрузок. - В кн.: Проблемы механики наземного транспорта.

Днепропетровск, ДИИТ. Вып. 195/24. 1977, с. 21-24.

5. Иванов А.В., Солодков С.П., Манашкин Л.А. Совершенствование кузовов электровагонов. - НИИИНФОРМТЭКМАШ, ТМ, 5-78-19, М., 1978, с. 20-23.
6. Кузьмич Л.Д., Иванов А.В. Исследование прочностных характеристик вагонов электропоездов. - Научно-техн.реферат. Сб. Транспортное машиностроение. Вып. 3, 1964, М., ЦИНТИАМ, с. 25-29.
7. А.с. 279691 (СССР) /Пружинно-фрикционный амортизатор для железнодорожного подвижного состава/. Иванов А.В. - Оpubл. в бюлл. "Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки", 1970, № 27, с. 48.

Л - 102710 от 3.12.81 Печ. л.1 Формат 60 90/16

Заказ № 263 Тираж 100 экз. Бесплатно

Ротапринтная ВНИИВ , ул. Рылеева, 35

Сканировала Камьянская Н.А.

НТБ
ДНУЖТ