

На правах рукописи



Кравцов Сергей Андреевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ПОВЫШЕНИЕ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОГЛОЩАЮЩИХ АППАРАТОВ
С ПОЛИМЕРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Брянск – 2023

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Болдырев Алексей Петрович

Официальные оппоненты: **Оганьян Эдуард Сергеевич**
доктор технических наук, старший научный сотрудник, акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава», главный научный сотрудник

Шорохов Сергей Геннадьевич
кандидат технических наук, обособленное подразделение ООО «ТМХ Инжиниринг» в г. Брянск, инженер-эксперт отдела экономической эффективности продукта

Ведущая организация: Акционерное общество Научная организация «Тверской институт вагоностроения», г. Тверь

Защита диссертации состоится «22» июня 2023 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ) по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

С учетом значительного объема перевозок грузов железнодорожным транспортом обеспечение их сохранности, а также повышение безопасности движения являются одними из важнейших направлений в создании и модернизации подвижного состава железных дорог. Актуальность работы связана, в том числе, и с возможностью увеличения вероятности соударения с повышенными скоростями. Это может привести к нанесению материального ущерба как подвижному составу, инфраструктуре, так и перевозимому грузу, обернуться экологической катастрофой или человеческими жертвами.

Значительное влияние на безопасность подвижного состава оказывают продольные нагрузки, возникающие во время экстренных режимов движения или при соударении вагонов на сортировочных станциях. Для снижения продольных нагрузок, а также для поглощения энергии соударения в конструкции автосцепного устройства подвижного состава предусмотрено использование межвагонного амортизатора удара – поглощающего аппарата. Поскольку поглощающие аппараты являются основным компонентом снижения продольной нагруженности, то они должны быть надежны, иметь достаточную прочность и энергоёмкость, а также силовую характеристику с рациональными параметрами.

Наиболее массовыми в эксплуатации являются аппараты класса Т1 (ГОСТ 32913-2014), используемые на подвижном составе, перевозящем грузы (кроме опасных), а также маневровых локомотивов массой до 100 т включительно. Среди аппаратов класса Т1 наибольшее распространение в настоящее время получили фрикционно-полимерные аппараты. В них основным компонентом поглощающим энергию является фрикционный узел, а комплект полимерных элементов играет роль подпорно-возвратного устройства.

Модернизации может быть подвергнут каждый элемент конструкции, но особый интерес представляет исследование и улучшение характеристик полимерного комплекта. Это связано с тем, что правильная работа по возврату поглощающего аппарата в исходное положение и удержание его в рабочем состоянии напрямую связана с надежностью работы всего автосцепного устройства. Также полимерный комплект поглощает часть энергии удара. Его конструкция из последовательно установленных полимерных элементов позволяет продолжить работу поглощающего аппарата в случае выхода из строя одного из элементов за счет снижения начальной затяжки.

Помимо использования полимерного комплекта в качестве возвратно-подпорного элемента существуют варианты конструкций поглощающих аппаратов, где полимерный комплект выполняет роль компонента, поглощающего энергию взаимодействия.

Таким образом, улучшение характеристик полимерного комплекта или разработка его новой конструкции может существенно сказаться на характеристиках поглощающего аппарата в целом и, как следствие, на сохранность подвижного состава и перевозимых грузов.

Степень разработанности темы. Современное представление о влиянии продольных нагрузок на подвижной состав железных дорог сформированы работами как отечественных, так и зарубежных исследователей. Научные труды таких ученых

как Жуковский Н.Е., Лазарян В.А., Блохин Е.П., Манашкин Л.А., Никитченко А.А., Никольский Л.Н., Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д., Хохлов А.А., Никольский Л.Н., Кеглин Б.Г., Кобищанов В.В., Антипин Д.Я., Кобзев С.А., Ступин Д.А., Письменный Е.А., Мямлин С.В., Николаев И.В., Клюка В.П., Матяш В.А., Гапанович В.А., Юхневский А.А., Скачков А.Н., Самошкин С.Л., Гончаров Д.Г. и др. позволили решить обширный круг задач, связанных с оценкой продольных сил, возникающих в процессе эксплуатации подвижного состава. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования вышеупомянутых авторов позволили создать методы исследования продольной динамики поезда, позволившие решить множество проблем и повысить безопасность и эффективность эксплуатации подвижного состава.

Изучение общей динамики вагона и применение полученных знаний значительно увеличило безопасность эксплуатации железнодорожного транспорта. Вопросами общей динамики подвижного состава занимались: Вериги М.Ф., Коган А.Я., Шадур Л.А., Ромен Ю.С., Орлова А.М., Третьяков А.В., Челноков И.И., Кальницкий Л.А., Соколов М.М., Бороненко Ю.П., и др.

Вопросами безопасности в области прочности и надежности конструкций занимались: Филиппов В.Н., Петров Г.И., Коссов В.С., Оганян Э.С., Волохов Г.М., Кобищанов В.В., Лозбинев Ф.Ю., Серпик И.А., Балалаев А.Н., Буйносов А.П., Смольянинов А.В., Пигунов А.В.

Исследованиями в области совершенствования конструкций амортизаторов удара подвижного состава, включая поглощающие аппараты, занимались такие ученые как: Никольский Л.Н., Кеглин Б.Г., Шлющенко А.П., Болдырев А.П., Селинов И.В., Селенский Е.И., Гуров А.М., Жиров П.Д., Белоусов А.Г., Фатьков Э.А., Васильев А.С., Войновский М.Г., Игнатенко Ю.В., Ступин Д.А., Беляев В.И., Харыбин И.А., Феоктистов И.Б., Крайзгур Г.Б., Кузьмич Л.Д., Бачурин Н.С., Горячев С.А., Андриянов С.С., Беспалько С.В., Козлов М.П., Котуранов В.А., Болотин М.М., Волков В.И. и др.

Цель и задачи. Целью работы является совершенствование методов расчета поглощающих аппаратов с полимерными комплектами, создание новых и модернизация существующих поглощающих аппаратов.

Достижение указанной цели связано с решением следующих задач:

- 1 обзор существующих конструкций поглощающих аппаратов и материалов, используемых при изготовлении полимерных комплектов;
- 2 анализ методов исследований продольной динамики подвижного состава железных дорог и оценки напряженно-деформированного состояния конструкций из гиперупругих материалов;
- 3 идентификация параметров математических моделей полимерных материалов, использующихся в поглощающих аппаратах, на основе результатов натуральных испытаний;
- 4 разработка методов расчета и проектирования поглощающих аппаратов с полимерными комплектами;
- 5 обоснование конструктивных решений полимерного комплекта и новой конструкции поглощающего аппарата;
- 6 модернизация серийного поглощающего аппарата с полимерным комплектом;

7 экспериментальное подтверждение адекватности предложенных математических моделей, а также работоспособности разработанного и модернизированного поглощающих аппаратов;

8 моделирование работы аппаратов на подвижном составе в эксплуатационных режимах;

9 оценка эффективности работы созданного и модернизированного поглощающих аппаратов на основе математического, компьютерного моделирования и натуральных экспериментов.

Объектом исследования в работе являются поглощающие аппараты подвижного состава, в конструкцию которых входят комплекты полимерных элементов.

Предметом исследования является продольная динамика грузового подвижного состава при маневровых соударениях и переходных режимах движения поезда.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1 предложен усовершенствованный метод идентификации математической модели полимерных материалов, применяемых в подвижном составе железных дорог, на основе экспериментальных исследований и методе конечных элементов;

2 разработан метод проектирования полимерных упругих элементов, применяемых в поглощающих аппаратах автосцепного устройства подвижного состава железных дорог;

3 созданы математические модели предложенных конструкций полимерного и фрикционного аппарата с полимерным комплектом;

4 теоретически и экспериментально исследована продольная динамика вагонов, оборудованных разработанными поглощающими аппаратами.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1 идентифицированы и реализованы математические модели полимерных материалов, используемых в конструкции существующих поглощающих аппаратов;

2 созданы нелинейные детализированные конечноэлементные модели полимерных комплектов, основанные на идентифицированной данными натуральных экспериментов модели;

3 на основе разработанных конечноэлементных моделей обоснованы параметры элементов полимерных комплектов, используемых в поглощающих аппаратах;

4 создан поглощающий аппарат, использующий в своей конструкции разработанный полимерный комплект, и проведены экспериментальные исследования;

5 усовершенствована конструкция фрикционного поглощающего аппарата ПМКП-110 и проведены ее экспериментальные исследования на стенд-горке;

6 с использованием математических моделей вагонов проведена оценка влияния разработанной и усовершенствованной конструкций поглощающих аппаратов на продольную динамику поезда при переходных режимах движения;

7 на основе компьютерного моделирования проведена оценка работы созданного и модернизированного поглощающих аппаратов при маневровых соударениях.

Методология и методы исследования. Для описания механических свойств полимерных материалов использовано математическое моделирование с идентификацией модели данными натуральных экспериментов. Исследование процессов деформирования полимерных комплектов в процессе эксплуатации аппаратов выполнено с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Анализ силовых характеристик полимерных комплектов проводился на основе данных натуральных испытаний. Методами математического и компьютерного моделирования исследованы динамические процессы, происходящие в составе поезда при переходных режимах, а также динамические усилия, действующие на подвижной состав при маневровых соударениях. Исследование силовых характеристик разработанных поглощающих аппаратов выполнено на основе натуральных испытаний на стенде-горке. Испытания проводились с помощью поверенного оборудования с регистрацией и обработкой данных на вычислительной технике и современном программном обеспечении.

В работе были приняты следующие допущения и ограничения:

- 1 при расчете параметров полимерных комплектов МКЭ не учитывалось влияние работы узлов и деталей поглощающих аппаратов;
- 2 идентификация параметров математических моделей поглощающих аппаратов осуществлялась с использованием натуральных испытаний, проведенных на стенд-горке БГТУ-АО «ПО Бежицкая сталь»;
- 3 исследовались разработанный и модернизированный поглощающие аппараты в эксплуатационных условиях без учета аварийных режимов;
- 4 при математическом моделировании переходных режимов движения поезда использовалась модель однородного подвижного состава, экипажи которого были оборудованы одинаковыми поглощающими аппаратами;
- 5 математическое моделирование переходных режимов движения поезда выполнялось с использованием двухмассовых моделей вагона.

Положения, выносимые на защиту:

- математические модели полимерных материалов, применяемых в поглощающих аппаратах автосцепки;
- усовершенствованный метод идентификации математической модели полимерных материалов, применяемых в подвижном составе железных дорог, на основе экспериментальных исследований и МКЭ;
- метод проектирования упругих полимерных элементов, применяемых в поглощающих аппаратах автосцепки;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований разработанного полимерного поглощающего аппарата;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований модернизированного фрикционного поглощающего аппарата с полимерным комплектом;
- обоснование эффективности использования разработанного и модернизированного поглощающих аппаратов на подвижном составе, выполненное методами математического моделирования.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- корректностью постановки задачи исследования, обоснованным выбором адекватных математических моделей, применением современных численных

методов расчетов;

– теория построена на корректном использовании методов математического моделирования и базируется на анализе опыта эксплуатации вагонов, экспериментальных данных и обобщения данных по продольной динамике железнодорожного подвижного состава;

– качественным и количественным согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований характеристик полимерных элементов и поглощающих аппаратов с данными, полученными автором лично и другими исследователями;

– для экспериментальных исследований использовано сертифицированное оборудование, включающее современные измерительно-вычислительные комплексы на базе крейтовых систем *MIC-026* и *LTR-EU-2*, датчики сил и перемещений. Обработка результатов экспериментов выполнена математико-статистическими методами.

Автором выполнена идентификация параметров математической модели полимерного материала, описан метод разработки полимерных комплектов, используемых в поглощающих аппаратах автосцепного устройства, определены параметры полимерных комплектов для разработанного и модернизированного поглощающих аппаратов, совместно с группой авторов разработан полимерный поглощающий аппарат и модернизирован серийный фрикционный поглощающий аппарат. Обоснована эффективность использования разработанного и модернизированного поглощающих аппаратов с помощью методов математического моделирования.

Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: региональная молодежная научно-техническая конференция «Электроника в XXI веке» (БГТУ, ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ», 2012), II научно-технический семинар «Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ» (БГТУ, 2014), III научно-технический семинар «Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ» (БГТУ, 2016), XXXII международная научно-практическая конференция «Вопросы науки 2022: потенциал науки и современные аспекты» («НИЦ ЭСП» в ЮФО, г.-к Анапа).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка литературы из 157 наименований и одного приложения. Общий объем диссертации 143 страницы основного текста, включая 89 рисунков, 25 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** выполнено обоснование актуальности работы и степени разработанности темы. Поставлены цели и задачи, выбраны методы проведения исследований, изложены научная новизна, основные положения и практическая ценность работы, показаны достоверность результатов и степень апробации.

В **первом разделе** работы проведен анализ состояния вопроса и степени разработанности проблемы по созданию новых и модернизации существующих полимерных комплектов поглощающих аппаратов. Проведен обзор существующих типов конструкций комплектов полимерных элементов.

На основе обзора результатов исследований отечественных и зарубежных ученых были обозначены основные факторы, влияющие на силовую характеристику полимерного комплекта.

Во **втором разделе** сформулированы основные требования, предъявляемые к поглощающим аппаратам. Проведен анализ существующих типов термопластичных материалов, в результате которого был выбран термоэластопласт вида ТРЕ-Е. Он сохраняет работоспособность в широком спектре температур и имеет механические характеристики, обеспечивающие создание полимерного комплекта необходимой жесткости. При анализе существующих марок материалов, в качестве материала принятого для разработки полимерных элементов был выбран материал *Durel*, используемый при производстве серийно выпускаемых полимерных элементов поглощающего аппарата ПМКП-110.

Проведено моделирование работы полимерного элемента из выбранного материала с помощью специализированного программного комплекса, реализующего решение высоконелинейных задач деформирования упругих тел. Это связано с необходимостью учета при моделировании трех сторон нелинейности: физической, описывающей нелинейное поведение материала, геометрической – учитывающей форму объекта и контактной – учитывающей изменение площади контакта взаимодействующих тел. Проведенный анализ существующих моделей материалов позволил принять в качестве модели, описывающей поведение выбранного материала, пятипараметрическую модель Муни-Ривлена:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{02}(I_2 - 3)^2, \quad (1)$$

где W – упругий потенциал, на единицу объема; $C_{10}, C_{01}, C_{20}, C_{11}, C_{02}$ – постоянные материала, определяемые с помощью идентификации; I_1, I_2, I_3 – главные инварианты тензора деформаций.

Указанная модель материала широко используется в промышленных пакетах, реализующих МКЭ и позволяет проводить анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) объекта любой сложности и степени нагруженности. Для принятой модели проведена идентификация постоянных материала.

Для определения постоянных материала существует возможность использовать как сторонние программы, так и встроенные в программный пакет реализующий МКЭ средства. Результаты испытаний стандартных образцов вносились в программный пакет, где и происходил поиск постоянных материала модели. Для обеспечения соответствия модели данным натурных экспериментов параметры модели могут быть скорректированы.

Процедуру моделирования можно разделить на следующие основные этапы:

- 1 определение экспериментальных характеристик полимерного материала и изготовленного из него упругого элемента;
- 2 создание конечноэлементной расчетной схемы полимерного элемента;
- 3 идентификация силовой характеристики элемента на основе данных натурных экспериментов и ее интеграция в разработанные конечноэлементные модели;

4 решение задачи деформирования элемента в принятых граничных условиях.

При моделировании целесообразно придерживаться следующих рекомендаций:

1 необходимо обеспечить максимальное соответствие геометрии модели испытываемому реальному объекту;

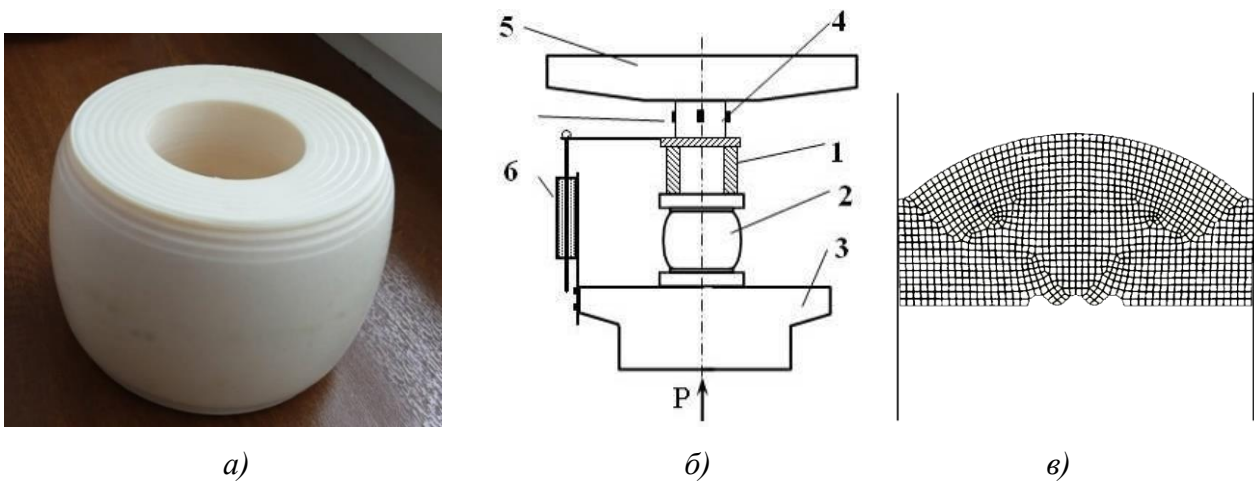
2 с учетом возможности изменения геометрических параметров элемента в эксплуатации необходимо использовать экспериментальные данные, в наибольшей степени соответствующие вероятным геометрическим размерам элемента.

3 целесообразно создать несколько моделей элементов с разными геометрическими параметрами, обеспечивающими наибольшее приближение каждой из них к реальному объекту. Это позволит получить обобщенную модель материала, соответствующую всем исследуемым элементам.

В работе для уточнения математической модели материала был выбран полимерный элемент, представленный на рисунке 1, а, испытанный в соответствии со схемой 1, б.

Получение статической характеристики полимерного элемента производилось после его стабилизации до уровня, при котором отклонения двух последовательных нагружений не превышало 5 % по величине силы и энергоемкости. Сам процесс стабилизации состоял из 30 нагружений усилием величиной 350 кН с промежутком между нагружениями не менее 3 минут.

На основе замеренных геометрических размеров опытного полимерного элемента была создана плоская конечноэлементная модель в осесимметричной постановке (рисунок 1, в).



а – полимерный элемент; б – схема испытаний; в – конечноэлементная модель элемента:

1 – скоба нажимная; 2 – испытываемый образец; 3 – стол пресса;

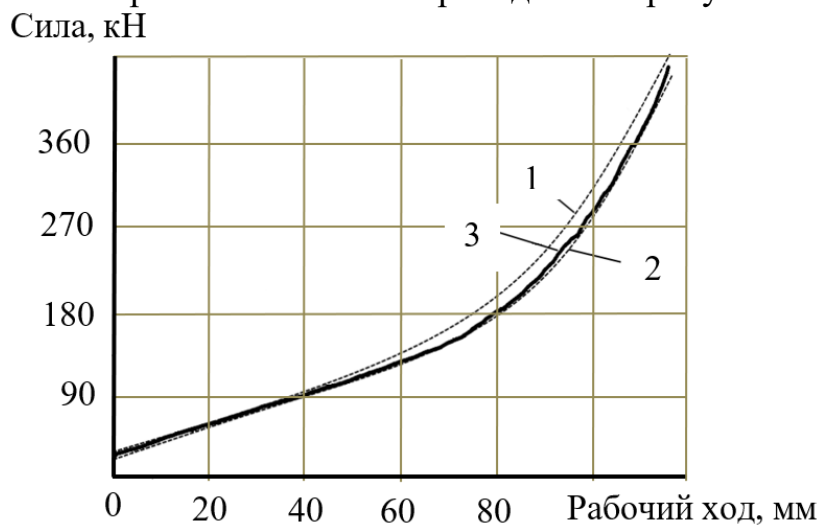
4 – динамометр; 5 – траверса пресса; 6 – датчик хода

Рисунок 1 – Испытание полимерного элемента

В результате моделирования были получены силовые характеристики полимерного элемента, указывающие на то, что расхождение по энергоемкости не превышает 5 %, что указывает на достаточную точность идентификации постоянных материала математической модели: $C_{10} = 1,58 \cdot 10^5$ Па; $C_{01} = 2,39 \cdot 10^6$ Па; $C_{11} = -1,44 \cdot 10^5$ Па; $C_{02} = 1,65 \cdot 10^6$ Па; $C_{20} = 7563$ Па.

Разработанный метод был апробирован на примере полимерного

комплекта серийного поглощающего аппарата ПМКП-110. Испытывались 20 полимерных комплектов результаты экспериментов в виде силовых характеристик полимерных комплектов приведены на рисунке 2.



1 – экспериментальная силовая характеристика с максимальной энергоемкостью и силой сжатия комплекта; 2 – экспериментальная силовая характеристика с минимальными энергоемкостью и силой сжатия комплекта; 3 – силовая характеристика модели

Рисунок 2 – Силовые характеристики полимерного комплекта

Расхождение между данными моделирования и эксперимента по энергоемкости и максимальной силе не превысили 7 %, что указывает на возможность использования предлагаемого метода для исследования полимерных элементов поглощающих аппаратов автосцепных устройств.

Третий раздел посвящен разработке конструкции нового и модернизации существующего поглощающего аппарата с полимерным комплектом.

На первом этапе выбрана форма и определены геометрические параметры полимерного элемента, обеспечивающие максимальный объем элемента и минимальные затраты при производстве. Полученный эскиз полимерного элемента представлен на рисунке 3.

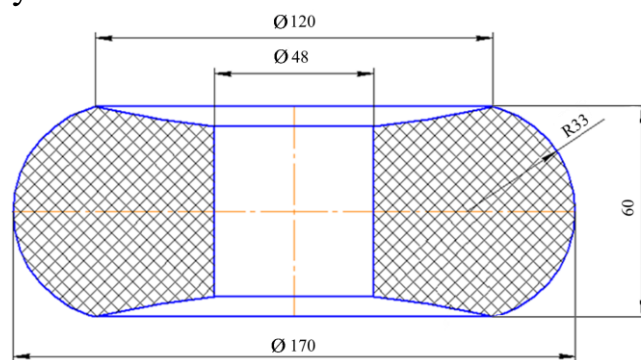


Рисунок 3 – Эскиз полимерного элемента опытного поглощающего аппарата

На основе многовариантных расчетов разработанных конечноэлементных моделей комплектов полимерных элементов определено количество элементов, обеспечивающее рациональную силовую характеристику комплекта.

На следующем этапе выполнены статические стендовые испытания полимерного элемента и составленного из них комплекта, показавшие, что максимальное значение расчетной силы сжатия комплекта находится в пределах 1,7 кН (рисунок 4).

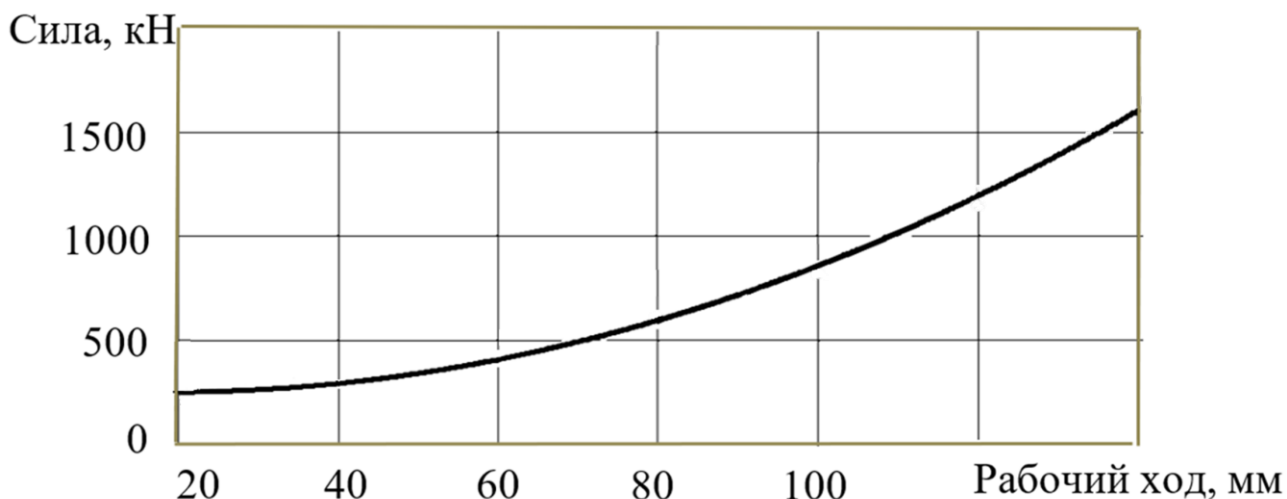


Рисунок 4 – Силовая характеристика комплекта поглощающего аппарата ТЭП-1

На базе полученного в результате проведенных исследований комплекта полимерных элементов предложена оригинальная конструкция поглощающего аппарата класса Т1, получившего рабочее название ТЭП-1 (рисунок 5). Для разработанной конструкции поглощающего аппарата проведены динамические испытания на стенд-горке БГТУ-АО «ПО Бежицкая сталь». Результаты испытаний представлены на рисунке 6.

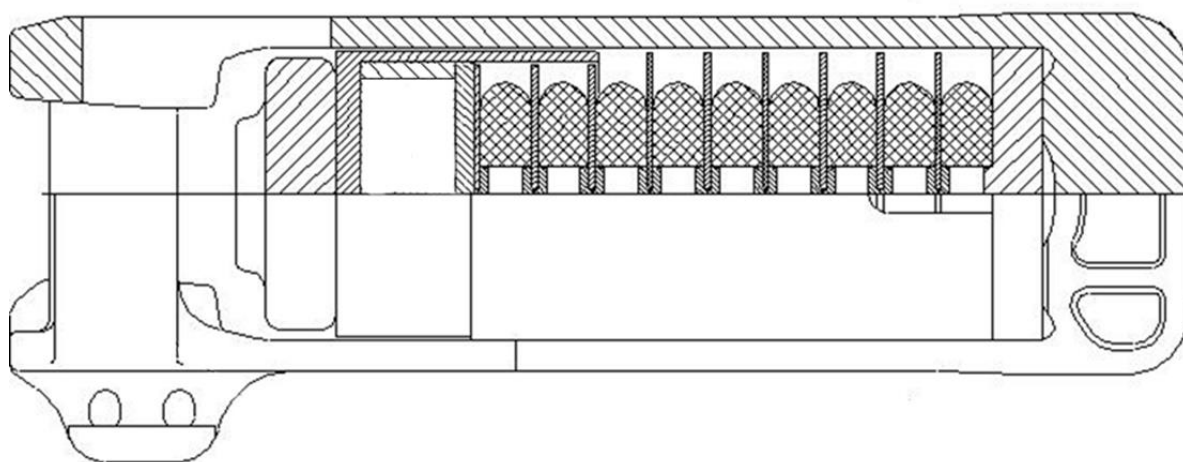


Рисунок 5 – Эскиз опытного образца поглощающего аппарата ТЭП-1

Энергоемкость, кДж

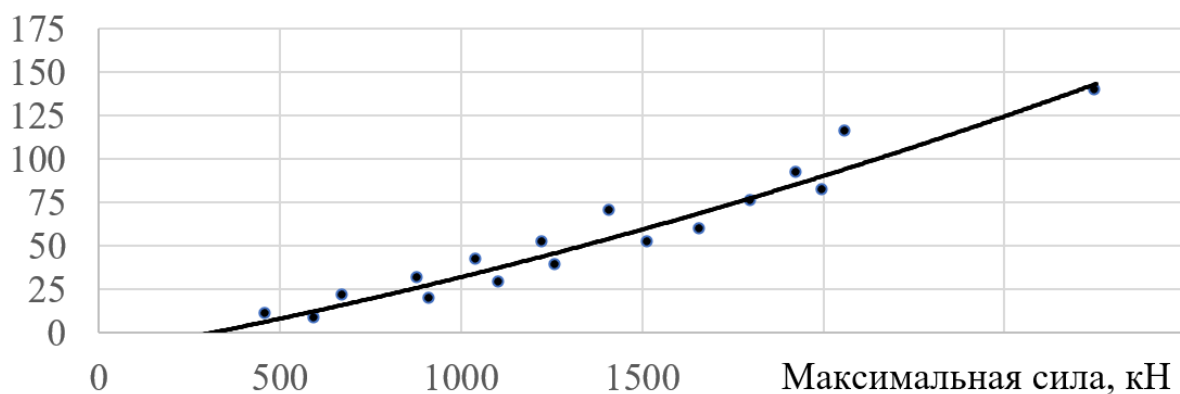


Рисунок 6 – Диаграмма зависимости энергоемкости от максимальной силы поглощающего аппарата во время испытаний на стенд-горке

По результатам испытаний номинальная энергоемкость поглощающего аппарата составила 87 кДж, максимальная – 115 кДж, коэффициент полноты достиг величины 0,602, а коэффициент необратимого поглощения энергии величины 0,822. При этом максимальная сила сжатия поглощающего аппарата не превысила регламентируемой ГОСТ 32913–2014 величины 3 МН. Полученные характеристики аппарата существенно превышают показатели для класса Т1.

С помощью разработанных конечноэлементных моделей выполнены исследования возможности повышения энергоемкости, максимальной силы полимерного элемента за счет использования полимерного элемента составной конструкции.

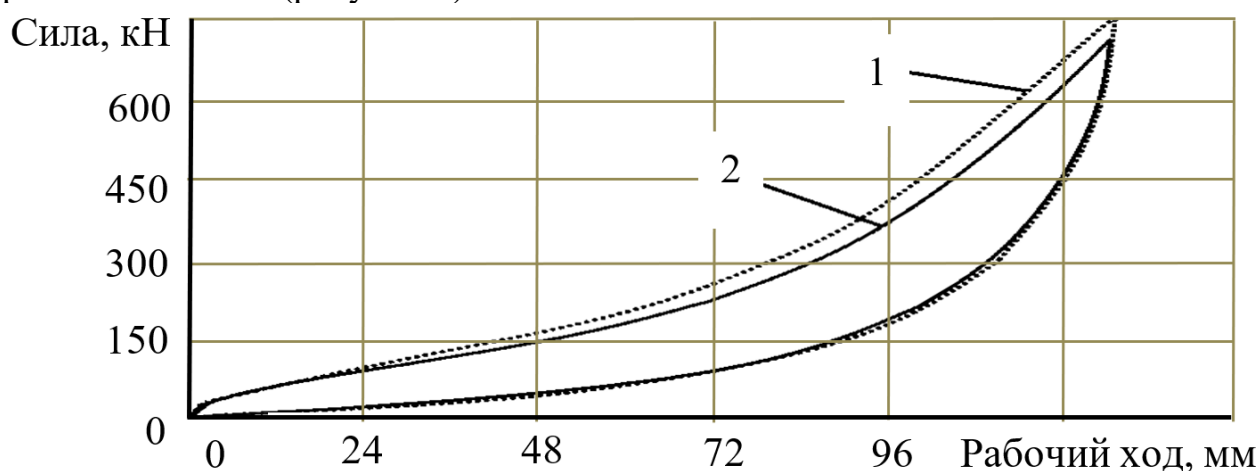
По результатам исследований предложено конструктивное решение составного полимерного элемента (рисунок 7), позволившего модернизировать поглощающий аппарат ПМКП-110 и обеспечить улучшение показателя его энергоемкости.



а – эскиз полимерного элемента; б – фотография полимерного элемента

Рисунок 7 – Составной полимерный элемент со втулкой

Для предложенной конструкции составного полимерного элемента и сформированного из них комплекта были проведены статические стендовые испытания, показавшие, что максимальная сжимающая сила в комплекте не превысила 750 кН (рисунок 8).



1 – шестое нагружение второго комплекта; 2 – шестое нагружение первого комплекта

Рисунок 8 – Силовые характеристики полимерных комплектов, сформированных из составных элементов

Для модернизированного, с использованием разработанных составных полимерных элементов, поглощающего аппарата ПМКП-120 проведены динамические испытания на стенд-горке БГТУ-ОА «ПО «Бежицкая сталь», результаты которых представлены на точечной диаграмме (рисунок 9).

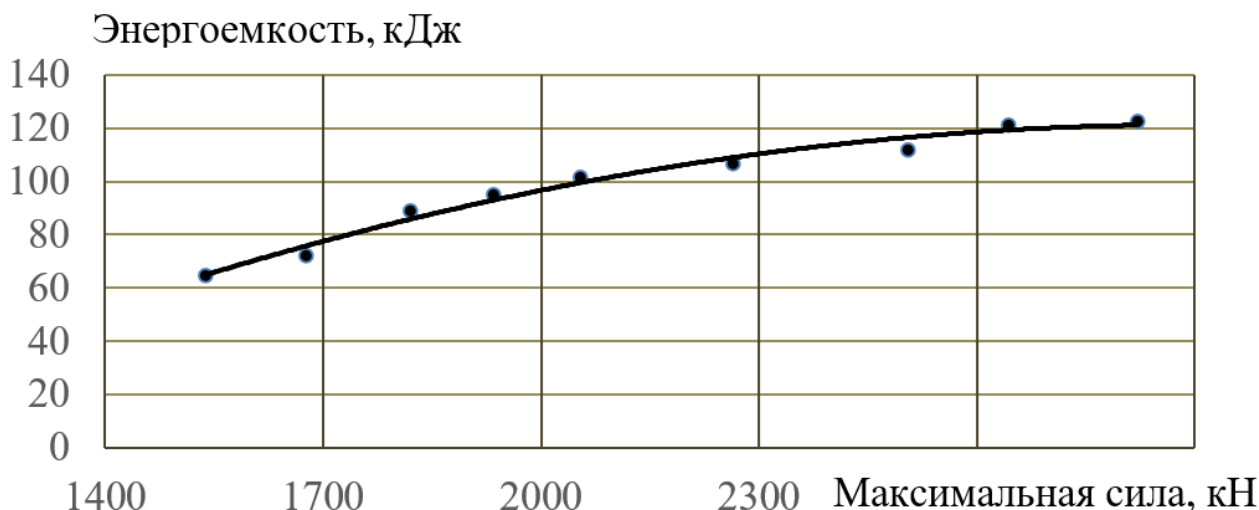


Рисунок 9 – Результаты динамических испытаний модернизированного поглощающего аппарата ПМКП-120 на стенд-горке

В результате испытаний номинальная энергоемкость аппарата ПМКП-120 составила 92 кДж, максимальная – 121 кДж, сила закрытия не превысила 3,0 МН.

В четвертом разделе выполнено моделирование эксплуатационных режимов поезда, вагоны которого оборудованы разработанными или модернизированными поглощающими аппаратами. Моделировались маневровое соударение, экстренное и полное служебное торможение, трогание поезда.

Работа поглощающих аппаратов в моделях описывалась зависимостями (2) для полимерного поглощающего аппарата ТЭП-1 и (3) для аппарата ПМКП-120 с модернизированным полимерным комплектом.

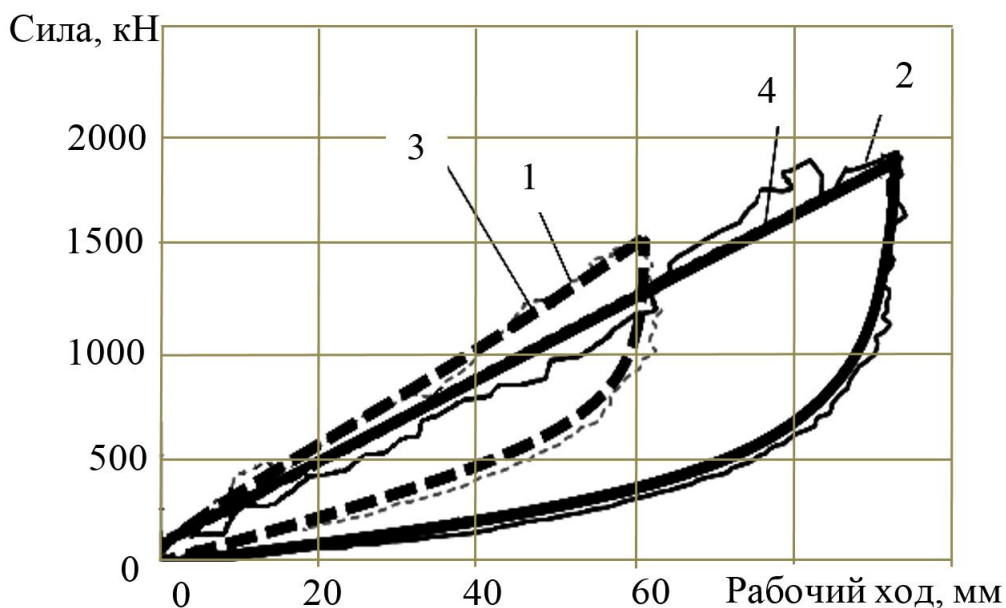
$$P(x, v) = (1 - 0,5\eta_{\text{CT}} \text{sign}(-v))(\beta_0 + \beta_1(x - x_0) + \beta_2(x - x_0)^2 + \beta_3(x - x_0)^3 + \beta_4(x - x_0)^4 + \beta_5(x - x_0)^5) + \mu \cdot c \cdot v + C_k |x - x_{\text{max}}| \cdot \text{sign}(x - x_{\text{max}}), \quad (2)$$

где C_k – жесткость корпуса, Н/м; x – деформация поглощающего аппарат, м; μ – коэффициент вязкого сопротивления; x_0 – начальная затяжка поглощающего аппарата, м; x_{max} – максимальный ход аппарата, м; η_{CT} – коэффициент необратимого поглощения энергии при квазистатическом сжатии; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ – коэффициенты получаемые при идентификации силовой характеристики полимерного комплекта.

$$P(x, v) = \begin{cases} \psi_1(v) i_1 F(x, v) & \text{при } x < a \quad \cap \quad v > 0 \\ \psi_2(v) i_1 F(x, v) & \text{при } x \geq a \quad \cap \quad v > 0 \\ c(x - x_{\text{max}}) + \psi_2(v) i_1 F(x, v) & \text{при } x \geq x_{\text{max}} \quad \cap \quad v > 0 \\ \psi_{1p}(v) i_1 F(x, v) & \text{при } x_{\text{max}2} - a < x < x_{\text{max}2} \quad \cap \quad v < 0 \\ \psi_{2p}(v) i_1 F(x, v) & \text{при } x \leq x_{\text{max}2} - a \quad \cap \quad v < 0 \\ c(x - x_{\text{max}}) + \psi_{2p}(v) i_1 F(x, v) & \text{при } x \geq x_{\text{max}} \quad \cap \quad v < 0, \end{cases} \quad (3)$$

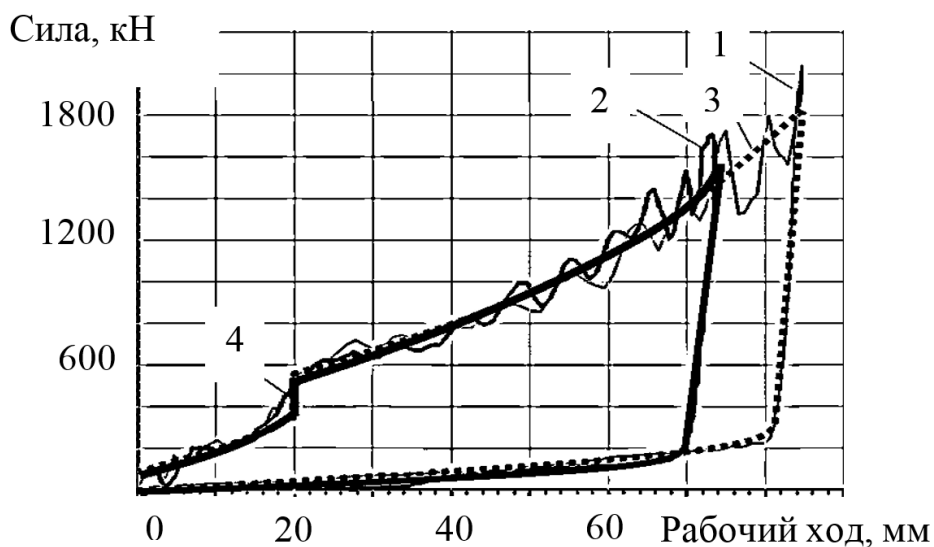
где ψ_j – коэффициенты передачи; c – жесткость корпуса аппарата, Н/м; i_1 – коэффициент передачи при отсутствии трения; x_{max} – максимально возможный ход аппарата, м; $x_{\text{max}2}$ – максимальный ход аппарата, достигнутый в данной ситуации, м; $F(x, v)$ – динамическая характеристика подпорной части аппарата.

Достоверность результатов получаемых с использованием приведённых моделей поглощающих аппаратов (формулы 2, 3) подтверждена их сопоставлением с результатами динамических испытаний на стенд-горке (рисунки 10, 11).



1 – экспериментальная при соударении со скоростью 1,66 м/с; 2 – 2,05 м/с;
3 – расчетная при соударении со скоростью 1,66 м/с; 4 – 2,05 м/с

Рисунок 10 – Динамические силовые характеристики поглощающего аппарата ТЭП-1



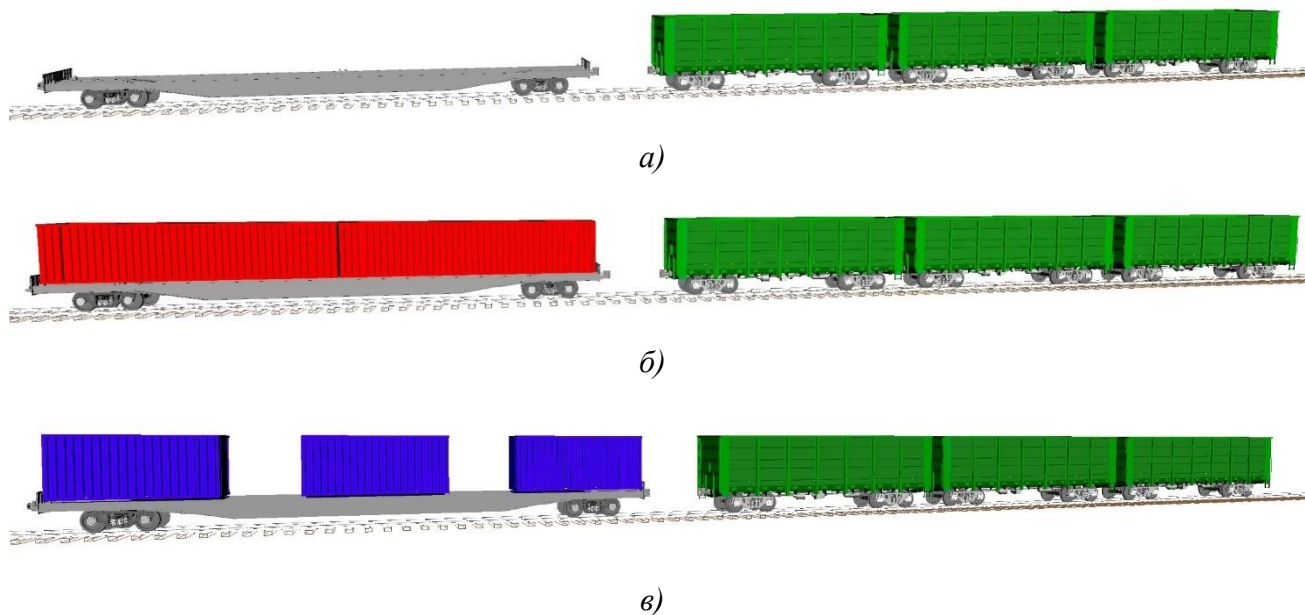
1 – экспериментальная при соударении со скоростью 1,56 м/с; 2 – 1,96 м/с;
3 – расчетная при соударения со скоростью 1,96 м/с; 4 – 1,56 м/с;

Рисунок 11 – Динамические силовые характеристики поглощающего аппарата ПМКП-120

Анализ результатов приведенных на рисунках 10, 11 показал расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышающее 3 % для модели описываемой уравнением (2) и 9 % для модели описываемой уравнением (3), что свидетельствует о возможности использования указанных моделей для расчета поездных режимов движения.

Для исследования динамических процессов соударения вагонов и локомотивов, оборудованных новым и модернизированным поглощающими аппаратами в среде «Универсальный механизм» были созданы твердотельные пространственные модели соударения вагона-платформы (рисунок 12).

Рассматривалось соударение со скоростью 12 км/ч порожнего вагона-платформы, вагона, загруженного двумя 40-футовыми контейнерами, и вагона, загруженного тремя 20-футовыми контейнерами, в подпор сформированный из полувагонов с общей массой 300 т. В качестве примера на рисунке 13 приведены зависимости ускорений вагона от времени при маневровых соударениях платформы с тремя 20-футовыми контейнерами, оборудованной различными поглощающими аппаратами. Полученные в результате моделирования величины ускорений для всех рассматриваемых режимов не превышают уровня, регламентированного нормативно-технической документацией.



a – порожняя платформа; *б* – платформа, загруженная двумя 40-футовыми контейнерами; *в* – платформа, загруженной тремя 20-футовыми контейнерами
Рисунок 12 – Динамические модели маневрового соударения

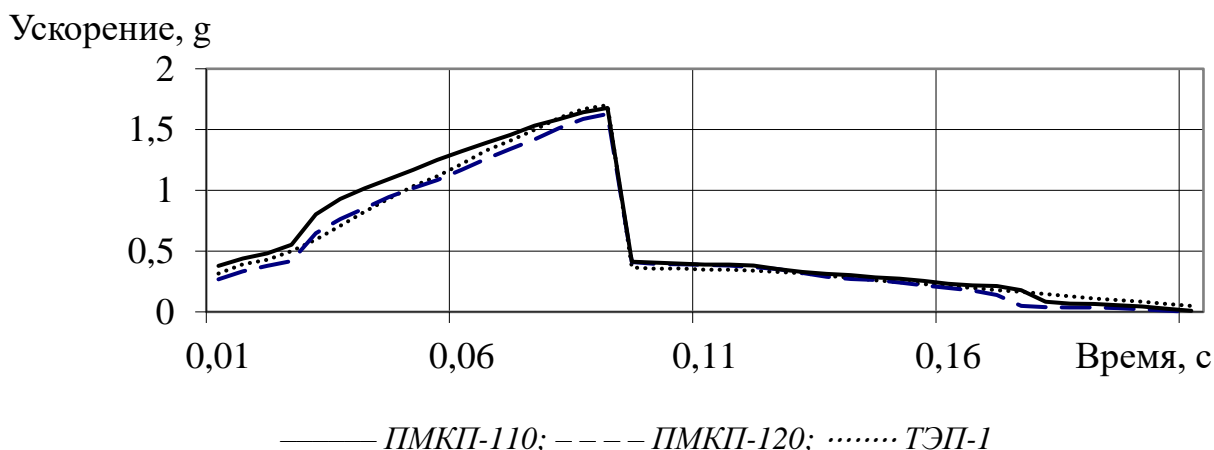


Рисунок 13 – Зависимости ускорений вагона от времени при маневровых соударениях платформы с тремя 20-футовыми контейнерами, оборудованной различными поглощающими аппаратами

На следующем этапе проводилось моделирование переходных режимов движения поезда разной массы с использованием расчетной схемы, показанной на рисунке 14.

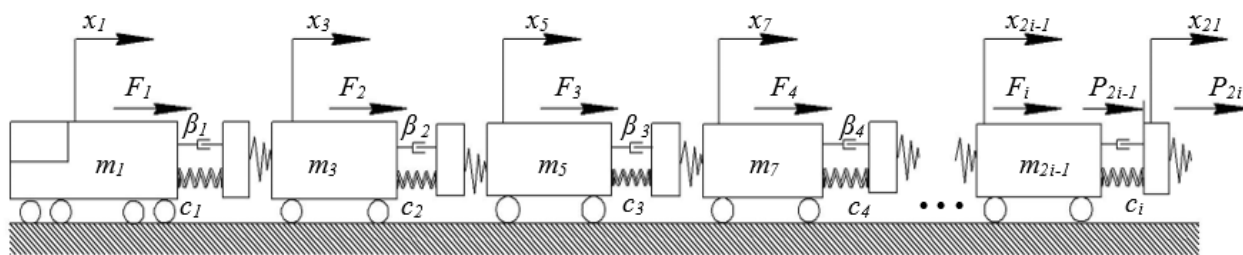


Рисунок 14– Расчетная схема поезда

На рисунке 14 F_i – сумма внешних сил, действующих на экипаж; c_i , m_i , β_i – параметры расчетной схемы i -го вагона; x_i – перемещение экипажа; $P_{2i} = P_{2i}(x_{wi}, v_{wi})$ – силовая характеристика межвагонной связи.

Выполнено моделирование переходных режимов движения поездов различной массы, вагоны которых оборудованы одинаковыми разработанными и модернизированными поглощающими аппаратами. В результате моделирования получены значения продольных сил, возникающих в вагонах в процессе эксплуатации, а также величины продольных ускорений вагонов при экстренном режиме торможения поезда. Полученные значения не превысили допустимых значений максимальных сил и ускорений, регламентированных нормативной документацией. В качестве примера на рисунке 15 представлены графики распределения максимальных сжимающих сил и ускорений по составу при экстренном торможении растянутого состава (10000 т) для различных поглощающих аппаратов (начальная скорость 22,5 км/ч).

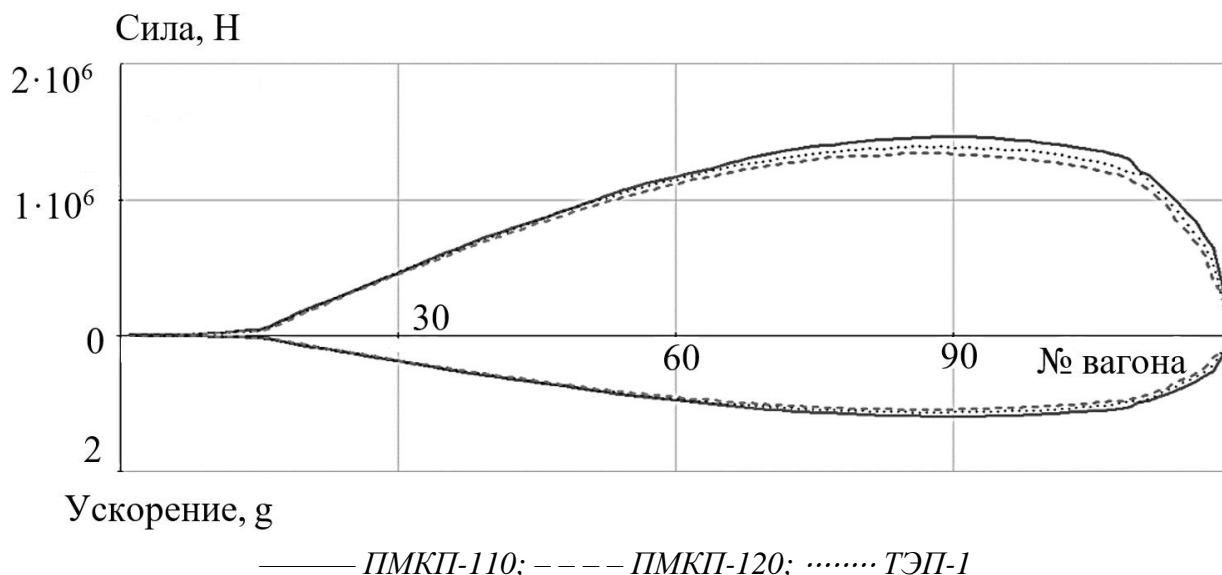


Рисунок 15 – Распределение максимальных сжимающих сил и ускорений по составу при экстренном торможении растянутого состава (10000 т) для различных поглощающих аппаратов (начальная скорость 22,5 км/ч)

Выполнено сопоставление результатов моделирования переходных режимов движения поезда, оборудованного серийными поглощающими аппаратами и предложенными в диссертации. Для аппарата ПМКП-120 при трогании поезда и торможении продольные силы ниже, чем у серийного аппарата ПМКП-110. Разница составляет до 19 % для коротких и средних составов (массой до 5500), до 30 % - для длинносоставных поездов. Указанная различие объясняется повышенной

энергоемкостью аппарата ПМКП-120. Для поглощающего аппарата ТЭП-1 при трогании поезда с места и торможения силы ниже, чем для серийно выпускаемого ПМКП-110. Разница составляет до 20 % для коротких и средних составов (массой до 5500 т), до 10 % - для длинносоставных поездов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Проведен анализ конструкций и принципов работы поглощающих аппаратов с полимерными элементами, определено направление исследований. Из условий ограничения габаритных размеров и максимальных деформаций определены основные показатели работы полимерных элементов и подпорных комплектов: максимальная сила, полнота силовой характеристики, коэффициент необратимого поглощения энергии и др.

2 Выполнен анализ методов исследований продольной динамики подвижного состава железных дорог и оценки напряженно-деформированного состояния конструкций из гиперупругих материалов с помощью МКЭ. Для расчета НДС использовалась модель материала Муни-Ривлена.

3 Выполнена идентификация параметров математической модели полимерного материала, использующегося в поглощающем аппарате, на основе результатов натурных испытаний. Коэффициенты используемой математической модели Муни-Ривлена при этом были равны: $C_{10} = 1,58 \cdot 10^5$ Па; $C_{01} = 2,39 \cdot 10^6$ Па; $C_{11} = -1,44 \cdot 10^5$ Па; $C_{02} = 1,65 \cdot 10^6$ Па; $C_{20} = 7563$ Па. Применение полученных коэффициентов при описании свойств материала в программных пакетах, реализующих МКЭ, позволяет рассчитать силовые характеристики элементов любой формы и размера, изготовленных из выбранного материала.

4 Разработаны методы проектирования и модернизации полимерных элементов использующие математические модели, учитывающие свойства полимерных материалов. Разработанные модели полимерных элементов (комплектов из них), использованы для проектирования новых и модернизации существующих конструкций полимерных комплектов и поглощающих аппаратов.

5 Разработаны конструкции полимерных элементов, проведены экспериментальные исследования образцов и комплектов, состоящих из них. Определены геометрические параметры полимерных элементов и комплектов. Разработана конструкция полимерного поглощающего аппарата, использующего полимерный комплект в качестве рабочего тела. Подготовлен опытный образец и проведены экспериментальные исследования поглощающего аппарата ТЭП-1. По результатам испытаний достигнуты значения номинальной энергоемкости – 87 кДж, максимальной энергоемкости – 115 кДж, что превосходит нормативные значения для класса Т1.

6 Модернизирована конструкция полимерного комплекта серийного поглощающего аппарата, применяемого на железнодорожном транспорте. В результате обеспечены значения энергоемкости, максимальной силы и коэффициента полноты для комплекта, превышающие показатели для серийного аппарата ПМКП-110.

7 Проведены экспериментальные исследования разработанного и модернизированного полимерных комплектов, и поглощающих аппаратов, позволяющие подтвердить адекватность результатов, получаемых с

использованием предложенных в работе математических моделей, а также работоспособность рассматриваемых аппаратов. Получены значения основных показателей работы поглощающего аппарата, превосходящие нормативные значения по классу Т1. Значение номинальной энергоемкости модернизированного аппарата ПМКП-120 составило – 92 кДж, максимальной энергоемкости – 121 кДж. Дальнейшие разработки позволят улучшить характеристики аппарата до уровня, соответствующего классу Т2.

8 Методами математического и компьютерного моделирования исследованы динамические процессы при маневровых соударениях вагонов и переходных режимах движения поезда с использованием разработанных моделей. Выполнена оценка эффективности работы созданного и модернизированного поглощающих аппаратов. Показано, что разработанный полимерный поглощающий аппарат ТЭП-1 обеспечил снижение максимальных растягивающих сил при трогании на величину до 20 %, при торможении максимальное снижение сжимающих сил составило на величину до 15 %. Модернизированный поглощающий аппарат ПМКП-120 позволил снизить максимальные растягивающие усилия при трогании на величину до 13 %, при торможении максимальные сжимающие силы – на величину до 30 %.

9 Выполнена оценка эффективности работы созданного и модернизированного поглощающих аппаратов (в сравнении с серийным поглощающим аппаратом ПМКП-110) на основе математического, компьютерного моделирования и натурных экспериментов. Установлено, что разработанные конструкции не уступают серийно выпускаемому аппарату в величине возникающих продольных сил в поезде. Экспериментальные данные показали, что разработанный аппарат ТЭП-1 имеет показатели номинальной энергоемкости выше серийного аппарата на 21 %, максимальной энергоемкости – на 24 %. Модернизированный поглощающий аппарат ПМКП-120 имеет показатели номинальной энергоемкости выше серийного аппарата на 28 %, максимальной энергоемкости – на 30 %.

10 Перспективой дальнейших разработок является совершенствование метода расчета и проектирования полимерного комплекта за счет учета диссипативных свойств материала элементов; влияния на свойства материала различных эксплуатационных факторов; разработки целевой функции для задачи оптимизации на основе минимизации материалоёмкости с заданными ограничениями. Применение усовершенствованного метода позволит создавать более совершенные полимерные комплекты и тем самым повысить надежность и безопасность подвижного состава.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

а) в рецензируемых научных изданиях:

1 **Болдырев, А. П.** Расчетно-экспериментальные исследования полимерного амортизатора удара [Текст]/ А.П. Болдырев, П.Д. Жиров, В.А. Алдюхов, С.А. Кравцов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – №1. – С. 16–22.

2 **Кеглин, Б. Г.** Разработка математических моделей и расчет характеристик полимерных амортизаторов / Б. Г. Кеглин, С. А. Кравцов А. П. Болдырев // Вестник Брянского государственного технического

университета. – 2013. – № 4(40). – С. 18–26.

3 **Кравцов, С.А.** Построение расчетных моделей деталей из гиперэластичных материалов, применяемых на железнодорожном транспорте / С. А. Кравцов, А. П. Болдырев, Ф. Ю. Лозбинев // Транспорт Урала. – 2022. – № 4(75). – С. 16–20.

4 **Кравцов, С.А.** Расчетно-экспериментальная оценка характеристик полимерных элементов / С. А. Кравцов, А. П. Болдырев, Ф. Ю. Лозбинев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2023. – Т. 20, № 1. – С. 7–16.

б) в других изданиях и материалах конференций:

5 **Жиров, П.Д.** Учет температурного фактора при моделировании работы фрикционно-полимерных поглощающих аппаратов автосцепки / П.Д. Жиров, С.А. Кравцов // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ: II научно-технический семинар, г. Брянск, 9–10 апреля 2014 г. [Текст]+[Электронный ресурс]: сб. тез. / под ред. Д.Ю. Погорелова. – Брянск: БГТУ, 2014. – 88 с. – С. 20–22.

6 **Васильев, А.С.** Крейтовая система сбора данных для проведения ударных испытаний поглощающего аппарата [Текст]/ А.С. Васильев, С.А. Кравцов // Электроника в XXI веке. Региональная молодёжная научно-техническая конференция: сб. материалов/ под ред. В.А. Хвостова, А.А. Малаханова. – Брянск: БГТУ, ЗАО «Группа Кремний Эл», 2012. – С. 55–57.

7 **Кравцов, С.А.** Поиск путей совершенствования полимерных элементов поглощающих аппаратов автосцепного устройства / С. А. Кравцов, А. П. Болдырев // Вопросы науки 2022: потенциал науки и современные аспекты: сборник научных трудов по материалам XXXII Международной научно-практической конференции, Анапа, 18 июля 2022 года. – Анапа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе, 2022. – С. 21–27.

8 **Жиров, П.Д.** Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик поглощающего аппарата ПМКП-110 / П.Д. Жиров, С.А. Кравцов // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ: III научно-технический семинар, г. Брянск, 6–7 апреля 2016 г. [Текст]+[Электронный ресурс]: сб. тез. / под ред. Д.Ю. Погорелова. – Брянск: БГТУ, 2016. – 100 с. – С. 30–31.

Учебное пособие

9 **Болдырев, А.П.** Продольная динамика подвижного состава железных дорог / А. П. Болдырев, П. Д. Жиров, Д. А. Бондаренко, С. А. Кравцов. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2022. – 149 с.

Кравцов Сергей Андреевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ПОВЫШЕНИЕ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОГЛОЩАЮЩИХ АППАРАТОВ
С ПОЛИМЕРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «__» _____ 2023г.
Объем 1,5 усл.п.л. Тираж 80 экз.

Формат бумаги 60×90¹/16
Заказ №