



005536136

На правах рукописи

ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФРИКЦИОННЫХ
ПОГЛОЩАЮЩИХ АППАРАТОВ АВТОСЦЕПКИ ЗА СЧЁТ
ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ РАСПОРНЫХ УЗЛОВ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

31 ОКТ 2013

Брянск 2013

Работа выполнена на кафедре «Динамика и прочность машин» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Брянский государственный технический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
Болдырев Алексей Петрович,

Официальные оппоненты:

Лозбинев Фёдор Юрьевич,
доктор технических наук, заведующий кафедрой математики и информационных технологий Брянского филиала ФГБОУ ВПО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации»

Расин Дмитрий Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет»

Ведущая организация:

ОАО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (ОАО «ВНИКТИ»),
г. Коломна

Защита состоится «26» ноября 2013 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.021.04 при ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет» по адресу: 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, 10-Б, в учебном корпусе № 4, ауд. Б 101 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет».

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 241035, Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7

Автореферат разослан «23» октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



С. Л. Эманов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Инновационное развитие и планомерная модернизация подвижного состава железных дорог – важнейшие цели, поставленные перед растущей экономикой Российской Федерации. Одно из наиболее важных направлений в концепции развития – обеспечение безопасности перевозок и сохранности перевозимых грузов. Фрикционные поглощающие аппараты, занимающие в общей структуре большую часть, являются эффективным средством снижения продольных нагрузок, действующих на вагон в эксплуатации. Экономическая целесообразность их использования неоспорима, но перспективы дальнейшего применения ограничены их низкой эксплуатационной эффективностью. Модернизация существующих и создание новых фрикционных амортизаторов удара, в которых использованы передовые технические решения и современные материалы, являются актуальными задачами исследований, что также подтверждается наметившейся общей тенденцией увеличения доли перспективных поглощающих аппаратов в вагонном парке подвижного состава.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью работы является разработка и исследование новых фрикционных поглощающих аппаратов автосцепки подвижного состава, превосходящих по своим характеристикам существующие аппараты и удовлетворяющих требованиям ОСТ 32.175–2001. Для реализации цели работы поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведен анализ конструкций и принципов работы фрикционных амортизаторов удара, выявлены их преимущества и недостатки.
2. Разработаны перспективные конструкции фрикционных аппаратов с новыми распорными узлами.
3. Построены математические модели новых амортизаторов удара и идентифицированы параметры на основе экспериментальных данных.
4. Исследованы динамические процессы при маневровых соударениях вагонов и переходных режимах движения поезда и оценено влияние параметров амортизаторов удара на эти динамические процессы.
5. Построен спектр продольных сил, действующих на грузовой вагон, оснащенный новыми поглощающими аппаратами
6. Оценена вероятность параметрического отказа разрабатываемых поглощающих аппаратов.
7. Проведен сравнительный анализ работы поглощающих аппаратов по различным показателям.
8. Проведены статические и динамические испытания опытных образцов новых аппаратов и их узлов.

Методология и методы исследований. Конструкции новых фрикционных поглощающих аппаратов разработаны в результате анализа эффективности и надежности работы узлов существующих аппаратов. Математические модели аппаратов построены

6

с учетом результатов экспериментов и особенностей физических процессов ударного сжатия. Нелинейные системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс работы аппаратов, решались с использованием эффективных численных методов, реализованных в современных прикладных математических программных пакетах. Обработка экспериментальных данных велась методами математической статистики с привлечением современной измерительной аппаратуры и специализированных программ. При идентификации параметров математических моделей применялись методы вычислительной математики.

Достоверность результатов. Достоверность результатов подтверждается тщательной постановкой задачи работы, корректным выбором математических моделей, описывающих реальные физические процессы; обеспечивается приемлемым согласованием расчетных и экспериментальных результатов, полученных автором лично и другими исследователями, использованием эффективных численных методов расчетов. Параметры математических моделей идентифицированы по результатам проведенных испытаний натурных образцов. Проведена проверка адекватности моделей по F-критерию Фишера.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Разработаны уточненные математические модели проектируемых поглощающих аппаратов и их распорных узлов, учитывающие процессы объёмного сжатия и дросселирования эластомерного рабочего тела, а также ударного сжатия полимерных амортизаторов.
2. Исследована динамическая нагруженность вагонов, оснащенных новыми поглощающими аппаратами, при маневровых соударениях и переходных режимах движения поезда.

На защиту выносятся:

1. Конструкции новых фрикционных амортизаторов удара и их математические модели.
2. Результаты расчетов характеристик аппаратов при маневровых операциях и переходных режимах движения поезда.
3. Статистическое распределение продольных усилий, действующих на вагон, оснащенный новыми амортизаторами удара.
4. Оценка вероятности параметрического отказа аппаратов.
5. Результаты экспериментальных исследований новых амортизаторов удара.

Практическая значимость результатов исследований.

1. Разработаны и защищены патентами РФ (RU 130935, RU 2486090) конструкции новых поглощающих аппаратов.
2. При помощи имитационного моделирования проведен сравнительный анализ работы поглощающих аппаратов. Результаты расчета могут быть использованы при выборе конструкции амортизатора, а также для обоснования целесообразности применения различных амортизаторов удара.

3. Построено статистическое распределение нагрузок, действующих в процессе эксплуатации на вагон, оборудованный новыми поглощающими аппаратами. Оценена вероятность параметрического отказа аппаратов.

4. Использование разработанных в диссертации математических моделей позволяет сократить сроки проектирования поглощающих аппаратов за счет снижения объема экспериментальных исследований.

5. Полученные результаты экспериментов для конструкций, использующих полимерные и эластомерные материалы, могут применяться при проектировании современных амортизаторов удара.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции «Энергетика, информатика, инновации - 2011» (г. Смоленск, 2011 г.), на III - IV международных научно-практических конференциях «Достижения молодых учёных в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании» (г. Брянск, 2011 – 2012 гг.), на III Региональной научно-практической конференции молодых специалистов «Проведение исследования по приоритетным направлениям современной науки для создания инновационных технологий» (г. Брянск, 2011 г.), на XXIII Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС-2011) (г. Москва, 2011 г.), на XIII Международной научно-технической конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта» (г. Днепрпетровск, 2012 г.), на Международной молодежной научной конференции «XXXVIII Гагаринские чтения» (г. Москва, 2012 г.), на IX международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика» (г. Смоленск, 2012 г.), на региональной молодежной научно-технической конференции «Электроника в XXI веке» (г. Брянск, 2012 г.), на II международной научно-практической конференции «Логистика–Инновации–Менеджмент» (г. Брянск, 2012 г.), на V Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы машиностроения» (г. Самара, 2013 г.), а также на научных семинарах кафедры «Динамика и прочность машин» ФГБОУ ВПО «БГТУ» (г. Брянск 2011 – 2012 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 16 печатных работ, в том числе 6 статей в журналах, входящих в перечень ВАК РФ; получены патент на изобретение RU 2486090 и патент на полезную модель RU 120935.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из трех глав, введения, заключения, списка использованных источников из 146 наименований. Общий объем диссертации составляет 142 страницы, включает 105 рисунков, 12 таблиц и 1 приложение на двух страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, приведены ее научная новизна и практическая значимость, изложена краткая характеристика работы

В первой главе диссертации приведен обзор работ по исследованию продольной нагруженности подвижного состава и межвагонных амортизирующих устройств, про-

веден подробный обзор и анализ конструкций поглощающих аппаратов отечественной и зарубежной разработки, показаны их достоинства и недостатки, обозначены направления и даны рекомендации по их совершенствованию, сформулированы цель и задачи исследования.

Приводится обзор научных работ С. В. Вершинского, П. Т. Гребенюка, А. Л. Лисицына, Л. А. Мутишштейна, Н. А. Панькина, В. А. Лазаряна, Е. П. Блохина, Л. А. Манапкина, С. В. Мямлина, А. А. Хохлова, О. Е. Пудовикова, М. М. Соколова, В. Д. Хусидова, Ю. Г. Минкина, С. А. Кобзева, Д. Ю. Погорелова, Л. Н. Никольского, Б. Г. Кеглина, И. В. Селинова, А. П. Болдырева, А. М. Гурова, И. Б. Феоктистова, Л. Д. Кузьмича, Д. А. Ступина, С. А. Горячева, С. С. Андриянова, Х. Т. Туранова, В. Ю. Бубнова, В. К. Гарга, Р. В. Дуккипати, А. А. Shabana, K. Popp, W. Schiehlen, S. Iwnicki, A. Wickens, F. Palcak, E. Kreuzer и др.

Анализируя работы, связанные с задачами продольной динамики, отмечается, что существующие алгоритмы и методы решения тесно связаны с применяемыми математическими моделями межвагонных амортизирующих устройств, которые за более чем 60 лет исследований существенно модернизировались и обновились. Однако в приведенных работах недостаточно исследованы вопросы продольной динамики вагонов, оборудованных современными амортизаторами удара, мало изучены проблемы соударений вагонов с разнотипными поглощающими аппаратами, отсутствуют алгоритмы решения соответствующих поездных задач. Остается актуальной задача разработки новых и внесения поправок и коррективов в существующие алгоритмы и методы исследования продольной динамики на основе уточненных математических моделей современных поглощающих аппаратов.

Рассмотрены различные современные амортизаторы удара. Подробно изучены как фрикционные поглощающие аппараты, используемые на подвижном составе уже долгое время, так и новые полимерные и эластомерные. Во многих работах выявлены и исследованы многочисленные недостатки при эксплуатации и неточности математического моделирования их работы, даны рекомендации по устранению. Однако конкретные решения проблем отсутствуют, не предложены конструкции аппаратов, в которых исключены выявленные недостатки. Также недостаточно изучены вопросы применения новых материалов и математического моделирования работы узлов, использующих эти материалы.

Несмотря на существование поглощающих аппаратов более совершенных типов, в ближайшее время на большей части вагонного парка сохранятся фрикционные аппараты. Этот выбор определен простотой их конструкции, низкой стоимостью, неприхотливостью в эксплуатации и отлаженной системой производства и ремонта. Но дальнейшее внедрение фрикционных аппаратов на вагонах разных типов ограничено в связи с их недостатками (низкая энергоёмкость, низкая стабильность работы и др.). Наиболее перспективными являются комбинированные поглощающие аппараты, работа которых построена на различных способах поглощения энергии удара. Проблема совершенствования и повышения эффективности фрикционных амортизаторов удара за счёт применения в них новых технологий и материалов является актуальной.

Во второй главе предложены конструкции новых фрикционных аппаратов, рассмотрены основные принципы их работы. Представлены основные технические характеристики, необходимые для построения математических моделей, приведены разработанные математические модели аппаратов при соударении вагонов. По результатам экспериментальных исследований проведена идентификация параметров разработанных математических моделей. Оценена адекватность математических моделей аппаратов. Осуществлен анализ эффективности работы аппаратов и выявлены рациональные параметры конструкций. Приведены результаты расчета продольной нагруженности вагонов. Рассчитано статистическое распределение продольных сил, действующих на вагон в эксплуатации. Оценена вероятность параметрического отказа для рассматриваемых объектов.

На основе анализа существующих конструкций фрикционных поглощающих аппаратов и их характеристик разработаны новые конструкции фрикционных амортизаторов с центральным плунжером в объемном распорном блоке: аппараты ПМК-РБП-120 (рис. 1) и ПМК-РБЭ-120 (рис. 2).

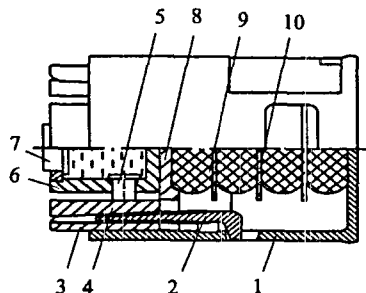


Рис. 1. Аппарат ПМК-РБП-120

Аппарат ПМК-РБП-120 содержит корпус 1, в котором установлена фрикционная часть, включающая неподвижные пластины 2 и подвижные пластины 3 и 4, имеющие уклоны на контактирующих поверхностях трения. Уклоны позволяют аппарату восстанавливаться при обратном ходе без заклинивания. Нормальное усилие на фрикционную часть передается от боковых плунжеров 5 распорного блока, состоящего из корпуса 6, верхнего плунжера 7 и боковых плунжеров. Полость распорного блока заполнена объемно сжатым рабочим телом, которое передает давление на боковые плунжеры в зависимости от внедрения в корпус распорного блока верхнего плунжера. Распорный блок опирается на плиту 8 и комплект упругих полимерных элементов 9, разделенных между собой пластинами 10.

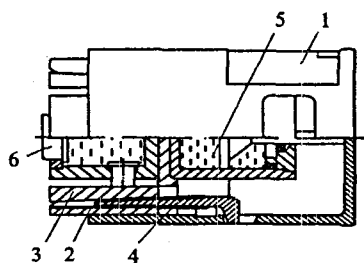


Рис. 2. Аппарат ПМК-РБЭ-120

У поглощающего аппарата ПМК-РБЭ-120 во фрикционном узле вместо клиновой системы также применяется упругий распор (рис. 2). Аппарат состоит из корпуса 1, подвижных 2 и 3, неподвижных 4 фрикционных пластин, подпорно-возвратного устройства – эластомерной вставки 5 и распорного блока 6.

Представленные конструкции не подвержены заклиниванию при обратном ходе, обладают повышенной энергоемкостью за счет дополнительных поверхностей трения. Стабильность работы и улучшение эксплуатационных пока-

зателей достигаются использованием во фрикционной части упругой распорной системы вместо клиновой.

Автором также были разработаны и защищены патентами РФ перспективные конструкции фрикционных амортизаторов удара с распорным узлом в виде эластомерной вставки АВК-120П (рис. 3) и АВК-120Э (рис. 4).

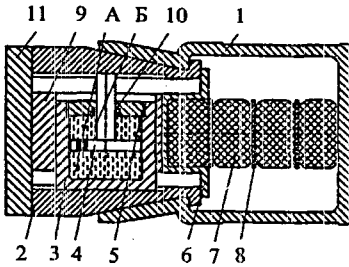


Рис. 3. Аппарат АВК-120П

Аппарат АВК-120П содержит полый четырехгранный корпус 1, в котором расположены фрикционные подвижные пластины 2, распорный узел, состоящий из цилиндра 3, штока 4 и крышки 5, толкатель 6, опирающийся на комплект полимерных элементов 7, разделенных между собой пластинами 8, массивная оправка 9. Распорный узел выполнен в виде цилиндра 3, внутри которого размещен шток 4. Цилиндр закрывает крышка 5, в которой располагаются уплотнения 10. Рабочие камеры цилиндра А и Б заполнены объемно сжимаемой композицией. Применение во фрикционном амортизаторе распорного узла такого типа и упругих полимерных элементов в качестве возвратно-подпорного устройства повышает эффективность и стабильность работы амортизатора. Во-первых, за счет нарастающего с ходом аппарата усилия прижатия фрикционных подвижных пластин к корпусу увеличивается сила трения, и существенно снижаются фрикционные автоколебания при скольжении. Во-вторых, благодаря высокому подпорному усилию удастся уменьшить угол наклона главных поверхностей трения, что позволяет разместить между фрикционными подвижными пластинами распорный узел необходимого габарита.

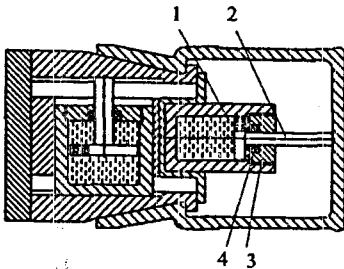


Рис. 4. Аппарат АВК-120Э

Фрикционно-эластомерный амортизатор АВК-120Э (рис. 4) отличается подпорно-возвратным устройством, включающим в себя цилиндр 1, шток 2 и запорную крышку 3 с уплотнениями 4. Принцип работы распорного узла аппарата аналогичен амортизатору АВК-120П. Исполнение подпорно-возвратного устройства и распорного узла аппарата в виде эластомерных амортизаторов обеспечивает повышенную эффективность и стабильность работы поглощающего аппарата в различных режимах эксплуатации вагона.

Для проектируемых поглощающих аппаратов удар вагона в недеформируемый неподвижный упор для математической модели, не учитывающей поперечную податливость корпуса (рис. 5), описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m_2 \ddot{x}_2 + P_s(x_2 - x_1, v_2 - v_1) = 0; \\ m_1 \ddot{x}_1 + P_s(x_1, v_1) - P_s(x_2 - x_1, v_2 - v_1) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где m_1 – масса корпуса аппарата и присоединенная часть массы рамы вагона; m_2 – масса остальной части вагона; P_a – сила сжатия амортизатора; P_e – сила, действующая на вагон.

Для аппаратов АВК-120П и АВК-120Э выражение для силы P_e на прямом ходе имеет вид

$$P_e = \frac{P_n \cos \gamma + 3P_{\text{двал}} \sin \gamma + 3f_1 P_{\text{двал}} \cos \gamma + f_3 P_n \sin \gamma - f_1 P_n \sin \gamma + f_3 f_1 P_n \cos \gamma}{f_2 \sin \gamma - \cos \gamma + f_1 \sin \gamma + f_2 f_1 \cos \gamma} \quad (2)$$

где f_1, f_2, f_3 – коэффициенты трения на главных и вспомогательных поверхностях трения; γ – угол наклона главных поверхностей трения. Для аппарата АВК-120П выражение для подпорной силы P_n имеет вид

$$P_n = [1 - \eta_{cm} \sigma_0(-\dot{x})] [c_n(x + x_0) + \beta_1(x + x_0)^3 + \beta_2(x + x_0)^5] + c_n \mu_n \dot{x}, \quad (3)$$

где x_0 – начальная затяжка аппарата; c_n, β_1, β_2 – коэффициенты, определяющие статическую характеристику полимерных элементов; μ_n – коэффициент вязкого сопротивления полимера; η_{cm} – коэффициент необратимого поглощения энергии полимера при квазистатическом сжатии. Для аппарата АВК-120Э выражение для силы P_n :

$$\begin{cases} P_n = q_c S_c - q_p S_p; \\ \frac{dq_c}{dt} = \frac{E + a q_c}{V_{c0} - x S_c} [Q_c + \dot{x} S_c]; \\ \frac{dq_p}{dt} = \frac{E + a q_p}{V_{p0} + x S_p} [Q_p - \dot{x} S_p]; \\ Q_c = -Q_{cp}; \\ Q_p = Q_{cp}, \end{cases} \quad (4)$$

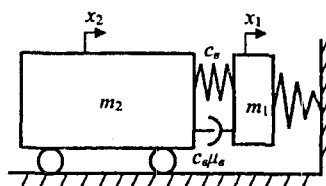


Рис. 5. Расчетная схема удара вагона в упор

где S_c, S_p – площади эффективного сечения камеры сжатия и камеры расширения эластомерной вставки; V_{p0}, V_{c0} – начальные объемы камер растяжения и сжатия; q_c, q_p – давления в камерах сжатия и расширения; Q_{cp} – расход эластомера через дроссельные каналы эластомерной вставки.

Дифференциальные уравнения, определяющие выражения q_c и q_p , описывают процесс объемного сжатия и дросселирования эластомерного рабочего тела в камерах распорного узла. Распорная сила $P_{\text{двал}}$ определяется аналогично выражению (4). Основное отличие заключается в размерах камер растяжения и сжатия распорного узла.

Для уточненного описания работы аппаратов разработаны математические модели, учитывающие поперечную податливость корпуса амортизаторов. Поглощающие аппараты представлены массой распорного устройства, массой пластин и присоединенной

части корпуса (рис. 6). Для аппаратов АВК-120П и АВК-120Э система дифференциальных уравнений, описывающих процесс ударного сжатия амортизатора, имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} m_2 \ddot{x}_2 + P_a = 0; \\ m_1 \ddot{x}_1 - P_a + P_a = 0; \\ m_3 \ddot{x}_3 + P_n = 0; \\ m_4 \ddot{x}_4 + P_{mp2} \text{sign}(\dot{x}_1) + P_{mp3} \text{sign}(\dot{x}_1) - P_{дам} + P_k = 0; \\ P_a = 2P_{mp1} \text{sign}(\dot{x}_1); \\ P_{дам} = q_{-c} S_{-c} - q_{-p} S_{-p}; \\ \frac{dq_{-c}}{dt} = \frac{E + a q_{-c}}{V_{-c0} - x_1 \text{tg} \gamma S_{-c}} [-Q_{-cp} + \dot{x}_1 \text{tg} \gamma S_{-c}]; \\ \frac{dq_{-p}}{dt} = \frac{E + a q_{-p}}{V_{-p0} + x_1 \text{tg} \gamma S_{-p}} [Q_{-cp} - \dot{x}_1 \text{tg} \gamma S_{-p}], \end{array} \right. \quad (5)$$

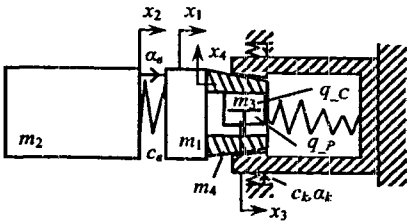


Рис. 6. Расчетная схема удара вагона в упор с уточненной моделью аппарата

где P_{mp1} , P_{mp2} , P_{mp3} – силы трения на главных и вспомогательных поверхностях трения; $P_{дам}$ – распорная сила давления в распорном узле; P_k – упруго-вязкая сила, действующая на массу m_4 со стороны корпуса в поперечном направлении; m_1 – масса корпуса аппарата и присоединенная часть массы рамы вагона; x_1 – перемещение массы m_1 ; m_2 – масса остальной части вагона; x_2 – перемещение массы m_2 ; m_3 – масса распорного узла; x_3 – перемещение массы m_3 ; m_4 – приведенная масса пластин и присоединенной части корпуса; x_4 – перемещение массы m_4 ; q_{-c} , q_{-p} – давления в камерах сжатия и расширения распорного узла.

При решении систем дифференциальных уравнений, описывающих динамические процессы ударного сжатия, использовались методы Рунге-Кутты 2-го и 4-го порядка, а также различные виды метода Адамса. Параметры математических моделей аппаратов были идентифицированы по результатам экспериментов. Экспериментальные исследования проводились параллельно с математическим моделированием. Для расчета идентифицируемых параметров использовалась целевая функция – критерий среднеквадратических отклонений расчетных сил и перемещений от экспериментальных:

$$Q = k_1 \int_0^{t_{max}} (P(t)_э - P(t)_м)^2 dt + k_2 \int_0^{t_{max}} (x(t)_э - x(t)_м)^2 dt, \quad (6)$$

где k_1 , k_2 – весовые коэффициенты; $P(t)_э$ – экспериментальное значение силы сжатия; $P(t)_м$ – расчетная сила сжатия; $x(t)_э$ – экспериментальное значение хода аппарата; $x(t)_м$ – расчетная величина хода аппарата. Минимизация критерия осуществлялась методом Хука-Дживса.

Ситуация удара вагонов, оборудованных аппаратами ПМК-РБП-120 и ПМК-РБЭ-120, в недеформируемый неподвижный упор по расчетной схеме, представленной на рис. 5, также описывалась системой дифференциальных уравнений (1). Сила сжатия амортизаторов определялась как

$$P_a = \psi P_H \quad (7)$$

где ψ – коэффициент передачи. Коэффициент передачи на этапе нагрузки ψ_H определяется:

$$\psi_H = \frac{3(\cos \gamma - f_1 \sin \gamma) + 2f_3(2f_1 + \sin \gamma + f_1 \cos \gamma)}{3(\cos \gamma - f_1 \sin \gamma) - 2B(2f_1 + \sin \gamma + f_1 \cos \gamma) - 2f_2(2f_1 + \sin \gamma + f_1 \cos \gamma)}, \quad (8)$$

где B – коэффициент, учитывающий силовые взаимодействия в распорном блоке.

Система дифференциальных уравнений, описывающих процесс ударного сжатия амортизаторов для модели, учитывающей инерционные свойства силовой системы по схеме на рис. 6, имеет вид

$$\begin{cases} m_2 \ddot{x}_2 + P_a = 0; \\ m_1 \ddot{x}_1 - P_a + P_a = 0; \\ m_3 \ddot{x}_3 - P_{\text{давл}1} + P_H - P_{\text{дон}} = 0; \\ m_4 \ddot{x}_4 + P_{\text{мп}2} \text{sign}(\dot{x}_1) + P_{\text{мп}3} \text{sign}(\dot{x}_1) - P_{\text{давл}2} + P_x = 0; \\ P_a = P_{\text{мп}1} \text{sign}(\dot{x}_1) + P_{\text{давл}1} + P_{\text{дон}}; \\ \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{E_0 + aq}{V_K + 2x_4 F_a - (x_1 - x_3) F_a} (-2\dot{x}_4 F_a + (\dot{x}_1 - \dot{x}_3) F_a), \end{cases} \quad (9)$$

где $P_{\text{дон}}$ – упруго-вязкая сила, действующая на массу m_1 со стороны распорного блока; P_x – упруго-вязкая сила, действующая на массу m_4 со стороны корпуса в поперечном направлении; m_3 – приведенная масса распорного блока; x_3 – перемещение массы m_3 ; m_4 – приведенная масса пластин, плунжера и присоединенной части корпуса; x_4 – перемещение массы m_4 ; $P_{\text{давл}1}$ и $P_{\text{давл}2}$ – силы давления на массы m_1 и m_4 ; V_K – рабочий объем распорного блока; q – давление в распорном блоке; F_a , F_o – площади поперечного сечения боковых и верхнего плунжеров распорного блока. Дифференциальное уравнение, определяющее выражение q , описывает процесс объемного сжатия эластомерного рабочего тела в распорном блоке.

Расчетные силовые характеристики перспективных поглощающих аппаратов представлены на рис.7 и рис. 8. На рис. 9 показана точечная диаграмма зависимости энергоемкости аппарата ПМК-РБП-120 от максимальной силы для уточненной математической модели. Наибольшую согласованность с экспериментальными данными показала математическая модель аппаратов, учитывающая поперечную податливость корпуса аппарата. Математическая модель прошла проверку адекватности по F -критерию Фишера. Погрешность по максимальной силе не превышает 8%, погрешность по ходу аппарата – 6%.

В задачу диссертации входили исследования продольной нагруженности вагонов, оснащенных разработанными аппаратами при различных поездных режимах движения. Рассматривались пуск поезда, а также различные режимы торможения. Для расчетных ситуаций анализировались распределения максимальных сжимающих и растягивающих сил по длине состава для коротких, средних и длинных составов (рис. 10). Рассматривались как однородные поезда, вагоны которых оснащены однотипными аппаратами, так и неоднородные составы, в которых перспективными аппаратами оснащались несколько вагонов. Все расчеты проводились с использованием программного комплекса «Train», разработанного на кафедре «ДПМ» БГТУ и позволяющего моделировать различные режимы эксплуатации железнодорожных транспортных средств.

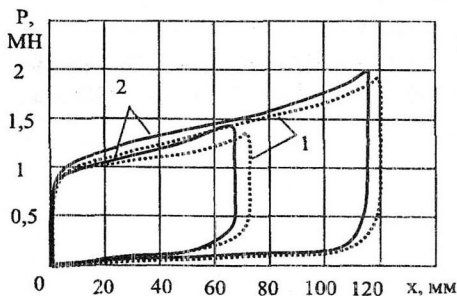


Рис. 7. Силовые характеристики аппарата АВК-120П при начальной скорости удара $V_0 = 2,05$ м/с для масс вагонов 44 т и 90 т: 1 – модель без учета поперечной податливости корпуса; 2 – модель с учетом поперечной податливости корпуса

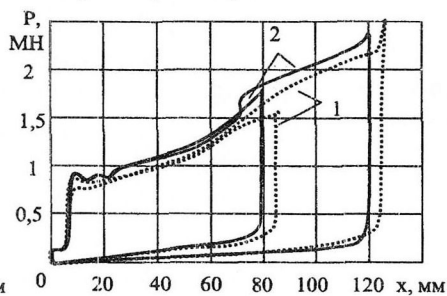


Рис. 8. Силовые характеристики аппарата ПМК-РБП-120 при начальной скорости удара $V_0 = 2,05$ м/с для масс вагонов 44 т и 90 т: 1 – модель без учета поперечной податливости; 2 – модель с учетом поперечной податливости корпуса

При пуске в ход для средних и длинных составов, оснащенных перспективными фрикционными аппаратами, характерно снижение значений продольных растягивающих усилий до 30% по сравнению с серийными аппаратами. Результаты исследований неоднородных поездов показали, что в сечениях состава, где размещены перспективные

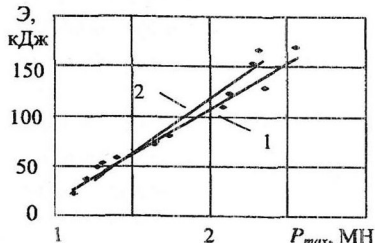


Рис. 9. Точечная диаграмма зависимости энергоемкости от максимальной силы для вагона массой m_n : 1 – 44 т; 2 – 90 т

фрикционные амортизаторы, наблюдается снижение сил на 20-25%.

Так же, как и для пуска поезда в ход, для ситуации экстренного торможения снижение уровня сил (15-25%) достигается для средних и длинных составов. Результаты исследования поездных режимов для неоднородных поездов показали, что значительное снижение сил на вагонах, оборудованных перспективными поглощающими аппаратами, наблюдается только для длинных составов. Для коротких и средних составов при экс-

тренном торможении включение перспективных аппаратов существенно не влияет на уровень сил.

Для построения статистического распределения продольных сил (рис. 11) рассмотрены все режимы эксплуатации грузового вагона. Результаты расчетов показали, что перспективные фрикционные аппараты эффективнее работают при маневровых соударениях по сравнению с серийными. Большая часть возникших сил попала в интервал 0,5-1,5 МН. Характерно снижение вероятности возникновения сил свыше 1,5 МН. Для поездных режимов также наблюдается снижение вероятности возникновения сил свыше 1 МН для перспективных поглощающих аппаратов.

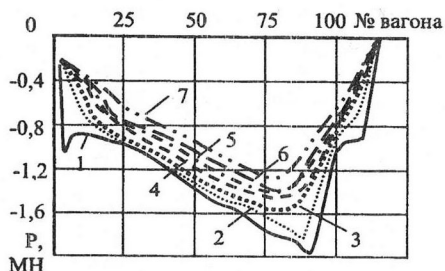


Рис. 10. Распределение продольных сил при экстренном торможении однородного состава массой 10000 т со скорости 22,5 км/ч: 1 – ПМК-110; 2 – ПМКП-110; 3 – ПМКЭ-110; 4 – АВК-120П; 5 – АВК-120Э; 6 – ПМК-РБП-120; 7 – ПМК-РБЭ-120

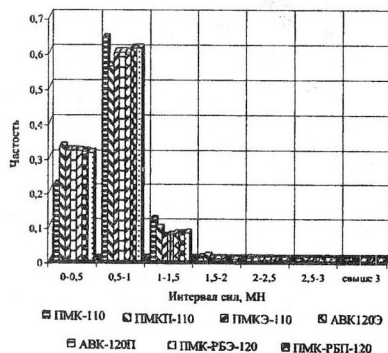


Рис. 11. Статистическое распределение экстремумов сжимающих сил

Вероятность параметрического отказа определялась как вероятность возникновения продольных сжимающих сил, превышающих предельную нагрузку. Для аппарата ПМК-РБП-120 вероятность параметрического отказа при превышении предельной нагрузки 2,5 МН и 3,5 МН меньше на 58% и 59% соответственно, чем для аппарата ПМКП-110; для аппарата АВК-120П – на 54% и 53%. В сравнении с аппаратом ПМКЭ-110 класса Т2 вероятность параметрического отказа амортизатора ПМК-РБП-120 ниже на 25% и 26%, а для амортизатора АВК-120П – ниже на 18% и 16%. Использование перспективных фрикционных амортизаторов удара снижает вероятность параметрического отказа и в большинстве случаев приводит к снижению продольных нагрузок.

В третьей главе приведена методика испытаний опытного образца нового аппарата и его узлов, проанализированы результаты стендовых статических и динамических испытаний. Даны рекомендации по усовершенствованию конструкций.

Из четырех проектируемых амортизаторов в качестве объекта испытаний был выбран поглощающий аппарат АВК-120П (рис. 12) и его основные узлы: распорное устройство – эластомерный амортизатор и подпорно-возвратное устройство – комплект полимерных элементов.

Целями статических испытаний были проверка работоспособности полимерного подпорного комплекта, оценка его устойчивости, проверка прочности и герметичности



Рис. 12. Аппарат АВК-120П

эластомерного распорного устройства, работы его уплотнений, получение экспериментальных силовых характеристик распорного и подпорного устройства для дальнейшей идентификации параметров математических моделей. Статические испытания проводились на гидравлическом прессе ПММ-250, где с помощью измерительного комплекса МС-026 фиксировалась статическая характеристика.

Динамические испытания аппарата АВК-120П и его основных узлов проводились на ударном стенде БГТУ-БСЗ. Целями стендовых ударных испытаний были определение выходных параметров амортизатора и основных эксплуатационных технических показателей, а также проверка его работоспособности в условиях динамического нагружения.

При статических нагружениях энергоёмкости подпорного и распорного устройств аппарата АВК-120П составили 19,75 кДж и 9,8 кДж соответственно. По результатам динамических испытаний этих узлов установлено, что энергоёмкости достигают 30 кДж и 25 кДж. При этом полнота силовых характеристик подпорного устройства достигает 0,43, а распорного — 0,8. При сравнении экспериментальных и расчётных силовых характеристик основных узлов аппарата установлено, что расхождение между ними как по максимальной силе, так и по ходу не превышает 8 %.

За время испытаний аппарата АВК-120П не было отмечено случаев отказа. Потеря устойчивости комплекта полимерных элементов подпорного устройства и их разрушение при соударениях не наблюдались. Распорное устройство в ходе испытаний герметично, утечки эластомера не зафиксировано. Нарушений в работе уплотнений также не выявлено. На обратном ходе аппарата полностью восстанавливается. Это позволяет сделать вывод о высокой надёжности конструкции.

На рис. 13 представлены силовые характеристики опытного аппарата АВК-120П при различных скоростях соударения.

По результатам испытаний номинальная энергоёмкость аппарата АВК-120П составила 100 кДж, коэффициенты полноты силовых характеристик 0,47...0,56. Высокие коэффициенты полноты силовой характеристики обеспечены отсутствием скачков сил при ударном сжатии. Силовые характеристики аппарата АВК-120П имеют пологий вид, что положительно сказывается на сохранности вагона и груза. Значения основных динамических показателей аппарата АВК-120П близки к нормативам для аппаратов класса Т2. Для повышения эффективности и надёжности работы аппарата предлагается оснастить фрикцион-

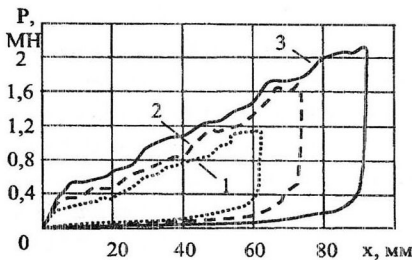


Рис. 13. Динамические силовые характеристики аппарата АВК-120П при начальной скорости соударения: 1 — 1,05 м/с; 2 — 1,56 м/с; 3 — 2,05 м/с

ные пластины износостойкими накладками из порошкового материала К-30, центрировать полимерные элементы подпорно-возвратного устройства, а также увеличить объем внутренней полости цилиндра распорного узла и толщину его стенок. Дальнейшие экспериментальные исследования должны проходить для конструкции аппарата с рациональными параметрами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе на основе проведенных исследований и выполненных разработок получены следующие результаты.

1. Проведен анализ конструкций, принципов работы и математических моделей существующих амортизаторов удара фрикционного типа. Наиболее перспективными являются комбинированные поглощающие аппараты, работа которых построена на различных способах поглощения энергии удара. Характерные недостатки фрикционных аппаратов (нестабильность силовых характеристик, скачкообразное изменение силы и др.) можно исключить, используя во фрикционной части аппарата распорные устройства, отличные от клиновой системы.

2. На основе анализа существующих конструкций амортизаторов фрикционного типа и их характеристик обосновано применение новых элементов конструкции проектируемых перспективных поглощающих аппаратов. Разработаны конструкции 4-х новых комбинированных аппаратов: ПМК-РБП-120 и ПМК-РБЭ-120 с центральным плунжером в объемном распорном блоке, АВК-120П и АВК-120Э с распорным узлом в виде эластомерной вставки. Конструкции защищены патентами РФ.

3. Разработаны математические модели распорных узлов проектируемых аппаратов. Параметры математических моделей идентифицированы на основе экспериментальных данных, получены силовые характеристики. Математические модели как распорных, так и подпорно-возвратных устройств аппаратов прошли проверку адекватности по F-критерию Фишера.

4. Разработаны математические модели проектируемых аппаратов ПМК-РБП-120, ПМК-РБЭ-120, АВК-120П и АВК-120Э с учетом поперечной податливости корпуса и без ее учета. Наибольшую согласованность с результатами экспериментов показала модель, учитывающая поперечную податливость корпуса аппарата. Расхождения по максимальной силе и по максимальному ходу не превысили 8%. После идентификации параметров по результатам проведенных статических и динамических испытаний математические модели аппарата АВК-120П прошли проверку адекватности.

5. Исследования на математических моделях, а также результаты испытаний показали, что силовые характеристики перспективных аппаратов лишены скачков силы, характерных для амортизаторов удара фрикционного типа. Максимальные силы сопротивления аппаратов зависят от начальной скорости соударения и определяются параметрами распорных элементов. При начальных скоростях соударения $v_0 < 1,6$ м/с силовые характеристики аппаратов АВК-120П, АВК-120Э близки характеристикам квази-

деального амортизатора удара (полнота силовых характеристик достигает 0,9).

6. На основе анализа влияния параметров конструкций на силовые характеристики проектируемых аппаратов рассчитаны рациональные параметры аппаратов, при которых достигаются максимальные значения энергоемкости и коэффициента полноты силовых характеристик. Значения эксплуатационных показателей аппаратов близки к нормативам для аппаратов класса Т2 и Т3: максимальные энергоемкости аппаратов АВК-120П, АВК-120Э, ПМК-РБП-120 и ПМК-РБЭ-120 составляют 161 кДж, 183 кДж, 191 кДж и 212 кДж соответственно.

7. С использованием имитационного моделирования проведены исследования продольной нагруженности вагонов, оснащенных перспективными аппаратами, при различных поездных режимах движения. Сравнение продольных сил в однородных и неоднородных поездах показало, что в большинстве расчетных ситуаций применение перспективных аппаратов приводит к снижению продольных нагрузок в сравнении с серийными амортизаторами. Наибольшее снижение уровня сил (до 30%) при применении перспективных аппаратов наблюдается в длинных составах.

8. Рассчитано статистическое распределение продольных нагрузок, действующих на вагон, оснащенный новыми аппаратами. При построении статистического распределения продольных сил рассмотрены все режимы эксплуатации грузового вагона. Результаты расчетов показали, что перспективные фрикционные аппараты по сравнению с серийными работают эффективнее при маневровых соударениях. Большая часть сил попала в интервал 0,5...1,5 МН. Характерно снижение вероятности возникновения сил свыше 1,5 МН. Для переходных режимов движения поезда также наблюдается снижение вероятности возникновения сил свыше 1 МН для перспективных поглощающих аппаратов. Полученный спектр можно рекомендовать для оценок нагруженности элементов вагонов, оснащенных перспективными поглощающими аппаратами.

9. Рассчитана вероятность параметрического отказа перспективных амортизаторов удара. Снижение вероятности параметрического отказа для новых аппаратов по сравнению с различными серийными аппаратами достигает 60%.

10. Изготовлен опытный образец аппарата АВК-120П. Проведены экспериментальные исследования поглощающего аппарата и его основных узлов с использованием современного испытательного оборудования и средств обработки результатов. Случаев отказа не зафиксировано. Отмечается высокая надежность работы распорного и подпорно-возвратного устройств. Номинальная энергоёмкость аппарата АВК-120П достигает 100 кДж, коэффициент полноты силовой характеристики – 0,56. Аппарат АВК-120П по своим показателям соответствует аппарату класса Т2. По результатам испытаний идентифицированы параметры математических моделей аппарата.

11. На основе проведенных исследований предложены технические решения, направленные на повышение эффективности работы и надежности аппаратов.

12. Общие методы, предложенные в работе, разработанные математические модели и полученные экспериментальные результаты могут быть использованы при решении подобных задач динамики, служить научной основой в синтезе других видов

амортизирующих устройств транспортных машин и значительно снизить сроки проектирования поглощающих аппаратов за счет сокращения объема экспериментов.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Васильев, А. С. Разработка фрикционных амортизаторов с объёмным распорным блоком / А. С. Васильев, А. П. Болдырев // Вестн. БГТУ. – 2011. - №2. – С. 25-30.

2. Васильев, А. С. Разработка и исследование фрикционного амортизатора удара с упругим распорным узлом / А. С. Васильев, Б. Г. Кеглин, А. П. Болдырев, А. П. Шлюшников // Вестн. БГТУ. – 2012. - №1. – С. 25-31.

3. Васильев, А. С. Исследование работы поглощающих аппаратов с объёмными распорными блоками / А. С. Васильев, Э. А. Фатьков // Вестн. БГТУ. – 2013. – №1. – С. 57-62.

4. Васильев, А. С. Исследование характеристик фрикционно-эластомерного амортизатора удара и расчёт напряжённо-деформированного состояния его узлов / А. С. Васильев // Вестн. БГТУ. – 2013. - №2. – С. 33-41.

5. Васильев, А. С. Оценка эффективности работы фрикционных металлокерамических элементов поглощающих аппаратов при различных условиях эксплуатации / А. С. Васильев, А. П. Болдырев, П. Д. Жиров, С. В. Боровикова // Вестн. БГТУ. – 2013. – №2. – С. 22-32.

6. Васильев, А. С. Экспериментальные исследования современных фрикционных амортизаторов удара подвижного состава железных дорог / А. С. Васильев, А. П. Болдырев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013.- том 15 – №4(2). – С. 507-510.

Документы на объекты интеллектуальной собственности:

7. Фрикционно-эластомерный поглощающий аппарат автосцепки. Патент РФ на полезную модель RU 120935 U1 / Алдухов В. А., Болдырев А. П., Васильев А. С., Гуров А. М., Кеглин Б. Г., Шлюшников А. П. // Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 10.10.2012. – Бюл. № 28.

8. Фрикционно-полимерный поглощающий аппарат автосцепки. Патент РФ на изобретение RU 2486090 C1 / Алдухов В. А., Болдырев А. П., Васильев А. С., Гуров А. М., Кеглин Б. Г., Шлюшников А. П. // Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 27.06.2013. – Бюл. № 18.

Публикации в прочих изданиях:

9. Васильев, А. С. Разработка перспективных фрикционных амортизаторов с объёмным распорным блоком / А. П. Болдырев, А. С. Васильев // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Энергетика, информатика, инновации – 2011». – Смоленск, 2011. – С. 159-164.

10. Васильев, А. С. Новое поколение комбинированных поглощающих аппаратов автосцепки подвижного состава / А. С. Васильев // Материалы III Международной науч-

но-практической конференции «Достижения молодых учёных в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании». – Брянск: БГТУ, 2011. – С. 19-20.

11. Васильев, А. С. Применение распорных устройств во фрикционных амортизаторах удара / А. С. Васильев// XXIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2011): материалы конференции (Москва, 14-17 декабря 2011 г.). – М: Изд-во ИМАШ РАН, 2011. – С. 224.

12. Васильев, А. С. Разработка конструкции и математическое моделирование фрикционных поглощающих аппаратов с объёмными распорными узлами / Б. Г. Кеглин, А. П. Болдырев, А. П. Шлющенко, А. С. Васильев// Проблемы механики железнодорожного транспорта: Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава, энергосбережение. XIII Международная конференция. Тезисы докладов. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2012. – С. 59-60.

13. Васильев, А. С. Новая методика расчёта эластомерных амортизаторов удара / А. С. Васильев// XXXVIII Гагаринские чтения. Научные труды Международной научной конференции. – М: МАТИ, 2012. – С. 134-135.

14. Васильев, А. С. Конструирование усовершенствованного фрикционного поглощающего аппарата и оценка прочности его узлов / А. С. Васильев // Информационные технологии, энергетика и экономика (информационные технологии, математическое моделирование технологических процессов). Сб. трудов 9-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Смоленск, 2012. – С. 168-173.

15. Васильев, А. С. Методика совершенствования математических моделей поглощающих аппаратов автосцепки, устанавливаемых на железнодорожных вагонах-цистернах / А. П. Болдырев, Р. Б. Гапчин, А. С. Васильев// «Логистика – инновации – менеджмент»: сборник тезисов Второй Международной научно-практической конференции «Логистика – инновации – менеджмент» Брянск, БГТУ, 27 апреля 2012 г. / под редакцией А. В. Лагерёва, Л. А. Карабан. - Брянск: БГТУ, 2012. – С. 163-164

16. Васильев, А. С. Расчёт характеристик перспективного фрикционно-эластомерного поглощающего аппарата автосцепки / А. С. Васильев, Р. Б. Гапчин// Материалы IV международной научно-практической конференции «Достижения молодых учёных в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании». – Брянск: БГТУ, 2012. – С. 9-10.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве:

В работах [1], [2], [3], [9], [12], [15], [16] – разработка конструкций и математических моделей перспективных фрикционных амортизаторов удара, анализ напряженно-деформированного состояния их основных узлов, расчеты на прочность методом конечных элементов, расчеты силовых характеристик аппаратов и рациональных параметров их конструкций. В работе [5] – оценка влияния эксплуатационных факторов на работу поглощающих аппаратов при маневровых операциях и переходных режимах движения поезда. В работе [6] – разработка методики испытаний поглощающих аппаратов, обобщение результатов экспериментов, идентификация параметров математических моделей аппаратов.

Васильев Алексей Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФРИКЦИОННЫХ ПОГЛОЩАЮЩИХ
АППАРАТОВ АВТОСЦЕПКИ ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ
ЭЛАСТОМЕРНЫХ РАСПОРНЫХ УЗЛОВ**

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 18.10.2013. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Офсетная печать. Усл. печ. л. 1. Уч.-изд. л. 1.

Тираж 100 экз. Заказ № 285. Бесплатно.

**Издательство Брянского государственного технического университета.
241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7, БГТУ. Телефон 58-82-49.
Лаборатория оперативной печати БГТУ, ул. Институтская, 16**