

На правах
рукописи



Сергеев Иван Константинович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ СИЛ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОРОЖНИХ И МАЛОЗАГРУЖЕННЫХ ВАГОНОВ В
ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДАХ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ).

**Научный
руководитель:** доктор технических наук, профессор
Филиппов Виктор Николаевич

**Официальные
оппоненты:** **Буйносов Александр Петрович**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Уральский
государственный университет путей сообщения», кафедра
«Электрическая тяга», профессор

Антипин Дмитрий Яковлевич
кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Брянский
государственный технический университет»,
«Учебно-научный институт транспорта», директор

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

Защита состоится 16 февраля 2023 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» 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 «__» декабря 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время на железных дорогах Российской Федерации наблюдается существенный рост грузопотоков. Причём повышение провозной и пропускной способности железных дорог является одной из важных целей, определяемых стратегией развития экономики страны. Указанное является причиной роста веса поездов, их длины и маршрутных скоростей движения.

Изменение конфигурации составов и условий их эксплуатации неизбежно приводит к изменению уровней динамических воздействий на конструкцию грузовых вагонов, а также на стабильность работы некоторых узлов, к числу которых относится тормозное оборудование. При этом указанное изменение не во всех случаях подвергается исследованию и анализу, существуют особые ситуации, возникновение которых, во-первых, связано с изменившимися характеристиками динамических процессов в узлах вагонов, а во-вторых, при неблагоприятных обстоятельствах может иметь крайне негативные последствия. К числу таких возможных последствий относится выжимание некоторых вагонов состава из рельсовой колеи под действием продольных сил.

Отмеченное проявляется особым образом при эксплуатации порожних и малозагруженных вагонов, включенных в поезда. Особенно актуально указанное для длиннобазных платформ, число которых на железных дорогах непрерывно увеличивается в связи с ростом популярности контейнерных перевозок. Длиннобазные платформы для шестидесятифутовых и восьмидесятифутовых контейнеров могут перевозить легковесные грузы и быть частично загруженными.

Отсутствие сведений о характерах силовых процессов в конструкциях узлов при некоторых режимах движения ставит вопрос **актуальности** работы, заключающейся в необходимости оценки безопасности движения порожних и малозагруженных вагонов в составах различной конфигурации при переходных режимах движения поездов.

Степень разработанности темы исследования. Проблемы динамической нагруженности подвижного состава, практические вопросы его конструирования и анализа влияния динамики на конструктивное исполнение ключевых элементов вагона изучались многими учёными. Свой значительный вклад внесли Н.Г. Беспалов, Е.П. Блохин, Г.И. Богомаз, М.М. Болотин, Ю.П. Бороненко, М.Ф. Вериго, С.В. Вершинский, Н.А. Панькин, В.Я. Першин, Ю.И. Першиц, А.В. Аванов, В.Е. Попова, А.Н. Просолов, Б.С. Ратнер, А.В. Смольянинов, М.М. Соколов, Е.Л. Стамблер, В.Ф. Ушаков, И.Б. Феоктистов, В.Н. Филиппов, П.С. Анисимов, В.Р. Асадченко, В.Д. Хусидов, Ю.М. Черкашин, И.И. Челноков, Л.А. Шадур, П.Т. Гребенюк, И.А. Добычин, Г.Б. Дурандин, и др.

Большой вклад в определение динамической нагруженности состава при опасных режимах движения внесли сотрудники Московского института инженеров транспорта (МИИТ) в семидесятых годах XX века. Ими был проведён ряд испытаний, целью которого было определение безопасных режимов соударения и аварийного поведения конструкций вагонов при ненормативном соударении. Результатом проведения этих испытаний стал разработанный впоследствии комплекс устройств защиты котлов цистерн, ориентированный на недопущение чрезмерно опасных

повреждений котла в случае возникновения аварийных ситуаций. При этом были изучены такие характерные типы аварий как «выкатка тележки», «пробой котла автосцепкой накатываемого вагона», «выжимание вагона» и др. В результате были получены данные, ставшие основой для ряда научных статей, изданных впоследствии.

Работы по оценке устойчивости малозагруженных вагонов в поездах проводились в шестидесятых и семидесятых годах XX века в Всероссийском научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) в связи с тем, что на некоторых электрифицированных участках железной дороги стало применяться рекуперативное торможение и стали возникать сходы из-за выжимания вагонов. Проведённые исследования были опубликованы в научных работах учёных-современников.

В статьях обсуждалась и доказывалась польза от необходимости формирования математических моделей с последующей программной реализацией, а большинство трудностей такого внедрения были связаны с текущим на тот момент уровнем развития вычислительной техники. В настоящее время исследованиями железнодорожной динамики активно занимаются сотрудники институтов ВНИИЖТ, Научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава (ВНИКТИ), университетов РУТ (МИИТ), Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС), Брянского государственного технического университета (БГТУ) и др.

Цель и задачи исследования. Целью работы является улучшение безопасности движения грузовых поездов при переходных режимах движения путём снижения риска выжимания порожних и малозагруженных вагонов под действием продольных сил.

В соответствии с поставленной целью в работе необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель движения многомассовой колебательной системы вагон – путь, учитывающую силы межвагонного взаимодействия и уклон профиля пути;

- на основе созданной математической модели разработать программу компьютерного моделирования процесса движения состава вагонов, позволяющую проводить исследование переходных процессов тяги и торможения;

- провести экспериментальные исследования влияния конфигурации тормозной системы грузового поезда на скорость распространения тормозной волны по длине состава;

- используя созданную программу и результаты натурных испытаний провести серию опытов компьютерного моделирования переходных режимов движения составов грузовых вагонов нескольких конфигураций при благоприятных и неблагоприятных условиях и сформулировать перечень практических рекомендаций по улучшению конструкции некоторых узлов грузового вагона с целью предотвращения выжимания порожних и малозагруженных вагонов.

Объектом исследования является процесс движения грузового вагона в составе поезда.

Предметом исследования является динамическая нагруженность грузового

вагона, возникающая в результате действия продольных сил при переходных режимах движения.

Научная новизна. Разработана математическая модель движения вагона в составе поезда, позволяющая учитывать переходные режимы движения и отдельно вычислять вертикальную и горизонтальную составляющую межвагонной реакции. Проведён натурный эксперимент по определению влияния числа воздухораспределителей на скорость распространения тормозной волны в грузовом поезде, а также численный эксперимент по определению динамической нагруженности состава при различных режимах движения. Имитационное моделирование межвагонных реакций проведено с учётом результатов натурального эксперимента.

Практическая значимость работы. Разработана программа, использование которой позволяет осуществлять имитационное моделирование движения состава вагонов при переходных процессах с учётом скорости распространения тормозной волны. Предлагается перечень практических рекомендаций, в который входит особая схема расположения тормозного оборудования, а также вариант полужёсткого закрепления кузова длиннобазной платформы. Перечень основан на экспериментах с компьютерной моделью, практическая реализация перечня позволит снизить величины межвагонных реакций и улучшить безопасность движения грузовых поездов.

Методология и методы исследования. Достижение цели исследования и решение задач осуществлялось с использованием следующих методов:

- метода анализа – при уточнении и конкретизации проблемы динамической нагруженности в обзоре литературы (раздел 1);
- метода моделирования – при составлении математической модели и разработки расчётной компьютерной программы (разделы 2 и 3);
- метода натурального эксперимента – при проведении лабораторных испытаний с тормозной станцией лаборатории кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» РУТ(МИИТ) (раздел 4);
- метода модельного эксперимента – при проведении экспериментов с созданной моделью при работе с программой (раздел 5);
- метода синтеза – при обработке результатов численного эксперимента и формировании перечня практических рекомендаций (раздел 5).

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель движения вагона в составе поезда и система дифференциальных уравнений, описывающая модель;
- результаты натурального эксперимента по определению влияния числа воздухораспределителей на скорость распространения тормозной волны в грузовых поездах;
- результаты компьютерного моделирования по движению составов грузовых вагонов различной конфигурации при благоприятных и неблагоприятных внешних условиях;
- перечень практических рекомендаций по улучшению безопасности движения грузовых поездов.

Степень достоверности работы основана на высокой степени сходимости

результатов решения аналогичной, ранее решённой задачи из области железнодорожной динамики, полученных методом компьютерного моделирования с использованием выбранного в настоящей работе численного метода интегрирования с результатами оригинального натурального эксперимента. Достоверность результатов натурального эксперимента подтверждается теоретическими зависимостями, полученными в результате исследования газодинамических процессов в тормозной системе грузовых поездов группой отечественных учёных.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на заседаниях кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Российского университета транспорта (РУТ(МИИТ)) в период с 2019 по 2022 г.; на международной интернет-конференции «Современные проблемы железнодорожного транспорта» в 2020 году; на VII Международной научно-практической конференции «Наука и техника: новые вызовы современности», в 2022 г.; на IX Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки и практики» в 2022 году; на IX Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники. Инноватика» в 2022 году.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, двух приложений. Работа изложена на 190 страницах в том числе: 151 страница основного текста, 86 рисунков, 16 таблиц. Список литературы содержит 145 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении произведен аналитический обзор исследований, посвященных проблеме выжимания порожних и малозагруженных вагонов. Обоснована актуальность темы, определены основные направления исследования, их научная новизна, поставлена цель и сформулированы задачи диссертации.

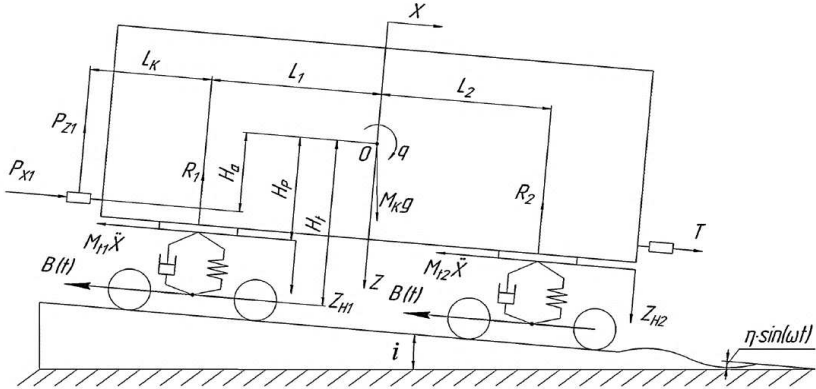
В первом разделе произведен анализ методов решения задач железнодорожной динамики, применявшихся отечественными и зарубежными учёными. Раскрыта история развития железнодорожной динамики как научной дисциплины, отмечены перспективы и пути её дальнейшего развития. На основе анализа был сделан вывод об актуальности применения метода математического и компьютерного моделирования для исследования темы диссертации. Проведён обзор и анализ программных комплексов, применявшихся для решения научных проблем динамики.

Сформулированы основная цель и задачи исследования, к которым относится проведение натурального эксперимента, составление математической и компьютерной модели движения вагона в поезде и проведение экспериментов по численному моделированию с полученной моделью. Для достижения поставленной цели исследования принято решение об использовании метода математического моделирования с программной реализацией модели в среде Embarcadero C++ Builder на языке программирования C++.

Во втором разделе выполнено формирование математической модели движения вагона в составе поезда под действием продольных сил. Составлена система дифференциальных уравнений, описывающая исследуемый процесс, конкретизированы функции внешних воздействий на систему. Проведён анализ

методов численного интегрирования систем дифференциальных уравнений, в качестве расчётного метода выбран метод Эйлера.

Математическая модель создана на основе плоской расчётной схемы и позволяет учитывать колебания галопирования, подпрыгивания и подёргивания (рисунок 1). В представленной модели учитываются геометрические параметры вагона и пути, в первую очередь влияющие на величину межвагонных реакций. Для точного моделирования сил межвагонного взаимодействия учитывается наличие поглощающих аппаратов различной конструкции в узле автосцепного устройства.



P_{x1} – горизонтальное усилие в межвагонной связи; P_{z1} – вертикальное усилие в межвагонной связи; T – сила тяги локомотива; $B(t)$ – тормозная сила, действующая на тележки вагона; R_1, R_2 – вертикальные реакции рессорных комплектов тележек; $M_{T1} \cdot \ddot{X}, M_{T2} \cdot \ddot{X}$ – силы инерции тележек вагона; L_1, L_2, L_K – базовые геометрические размеры вагона, учитывающие смещения центра тяжести груженого вагона по оси X ; H_a – возвышение центра тяжести вагона над продольной осью хребтовой балки; H_p – возвышение центра тяжести вагона над опорной поверхностью пятников; H_t – возвышение центра тяжести вагона над осью колёсной пары; x, z, q – координаты и их производные по времени в уравнениях; i – угол наклона элемента продольного профиля пути, на котором находится вагон; M_k – масса обрессоренных частей вагона; M_{T1}, M_{T2} – масса необрессоренных частей вагона; $M_k g$ – сила тяжести, действующая на кузов вагона с грузом; J_k – момент инерции кузова вагона, относительно поперечной оси Y , совпадающей с положением центра тяжести в точке O ; η – амплитуда неровности пути; ω – частота возмущения от неровности пути на колёсную пару; x, z, q – соответственно ось продольного, вертикального и углового перемещения вагона

Рисунок 1 – Математическая модель движения вагона в составе поезда

Система дифференциальных уравнений для состава вагонов (2) составлена на основе расчётной схемы единичного вагона и второго закона Ньютона. В систему (2) нелинейно входят функции внешних воздействий, описываемые эмпирическими зависимостями (1), (3) - (7).

Сила тяги локомотива описывается следующим выражением:

$$T = \begin{cases} 28800 \cdot \left(14,6 - \frac{0,9v}{14}\right) & \text{при } v < 14 \\ 28800 \cdot (-9 \cdot 10^{-5}v^3 + 0,017348v^2 - 1,11875v + 26,53218) & \text{при } v \geq 14, \end{cases} \quad (1)$$

где v – скорость движения состава, м/с.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 M_{k_0} \ddot{X}_0 + P_{x2_0} + M_{t2_0} \ddot{X}_0 + M_{t1_0} \ddot{X}_0 + B(t)_0 - P_{x1_0} - M_{k_0} g \sin \alpha_0 = 0 \\
 M_{k_0} \ddot{Z}_0 + P_{z1_0} + P_{z2_0} + R_{1_0} + R_{2_0} - M_{k_0} g \cos \alpha_0 = 0 \\
 J_{k_0} \ddot{q}_0 - P_{z2_0} (L_{2_0} + L_{k_0}) + P_{z1_0} (L_{1_0} + L_{k_0}) + P_{x2_0} [H_{a_0} - (L_{2_0} + L_{k_0}) q_0] - \\
 - P_{x1_0} [H_{a_0} + (L_{1_0} + L_{k_0}) q_0] - R_{2_0} L_{2_0} + R_{1_0} L_{1_0} + B(t)_0 \cdot H_{t_0} = 0 \\
 \\
 M_{k_1} \ddot{X}_1 + P_{x2_1} + M_{t2_1} \ddot{X}_1 + M_{t1_1} \ddot{X}_1 + B(t)_1 - P_{x1_1} - M_{k_1} g \sin \alpha_1 = 0 \\
 M_{k_1} \ddot{Z}_1 + P_{z1_1} + P_{z2_1} + R_{1_1} + R_{2_1} - M_{k_1} g \cos \alpha_1 = 0 \\
 J_{k_1} \ddot{q}_1 - P_{z2_1} (L_{2_1} + L_{k_1}) + P_{z1_1} (L_{1_1} + L_{k_1}) + P_{x2_1} [H_{a_1} - (L_{2_1} + L_{k_1}) q_1] - \\
 - P_{x1_1} [H_{a_1} + (L_{1_1} + L_{k_1}) q_1] - R_{2_1} L_{2_1} + R_{1_1} L_{1_1} + B(t)_1 \cdot H_{t_1} = 0 \\
 \\
 \dots \\
 \\
 M_{k_i} \ddot{X}_i - T + M_{t2_i} \ddot{X}_i + M_{t1_i} \ddot{X}_i + B(t)_i - P_{x1_i} - M_{k_i} g \sin \alpha_i = 0 \\
 M_{k_i} \ddot{Z}_i + P_{z1_i} + P_{z2_i} + R_{1_i} + R_{2_i} - M_{k_i} g \cos \alpha_i = 0 \\
 J_{k_i} \ddot{q}_i - P_{z2_i} (L_{2_i} + L_{k_i}) + P_{z1_i} (L_{1_i} + L_{k_i}) - T [H_{a_i} - (L_{2_i} + L_{k_i}) q_i] - \\
 - P_{x1_i} [H_{a_i} + (L_{1_i} + L_{k_i}) q_i] - R_{2_i} L_{2_i} + R_{1_i} L_{1_i} + B(t)_i \cdot H_{t_i} = 0,
 \end{array} \right. \quad (2)$$

Для тормозной силы, действующей на тележку вагона:

$$\frac{B_i(t)}{9800} = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 4,6 \\ \min \left(0,3 + \frac{2,26}{2,8} \cdot (t - 4,6), (7,8 \cdot 10^{-5} v^2 - 0,01478 v + 2,7) \right) & \text{при } t \geq 4, \end{cases} \quad (3)$$

где v – скорость движения состава, м/с.

t – время с момента срабатывания воздухораспределителя, с.

Возмущение от неровности пути описывается следующим выражением:

$$\eta = \eta_0 \cdot \sin \left(\frac{2\pi v[i]}{L_H} \cdot t \right), \quad (4)$$

где η_0 – амплитуда неровности пути, м;

$v[i]$ – скорость движения i -го вагона, м/с;

L_H – расчётная длина рельса, м;

t – время процесса, с.

Реакции в рессорном комплексе описываются согласно следующей формуле:

$$R = C_r[i] \cdot (\Delta z[i] + \eta(v[i], t[i])), \quad (5)$$

где C_r – приведённая суммарная жёсткость рессорного комплекса i -го вагона, МН/м;
 $\Delta z[i]$ – приращение вертикального перемещения центра масс i -го вагона за шаг интегрирования, м;

$\eta(v[i], t[i])$ – воздействие от неровностей пути на i -й вагон состава, м.

Для вычисления горизонтальной и вертикальной реакции в поглощающем аппарате используются следующие выражения:

$$P_x[i] = \text{Reaction}(x, v, \text{type}, \alpha) \quad (6)$$

$$P_z[i] = P_x[i] \cdot \frac{\Delta z[i]}{\Delta x[i]}, \quad (7)$$

где $Reaction(x, v, type, \alpha)$ – функция вычисления межвагонной реакции в аппарате, зависящая от величины межвагонной деформации, скорости деформации, типа поглощающего аппарата и продольной жёсткости рамы;

$P_x[i]$ – реакция в поглощающем аппарате i -го вагона, МН;

$\Delta x[i]$ – величина межвагонного промежутка i -го вагона, м;

$\Delta z[i]$ – расстояние между продольными осями автосцепок i -го вагона, м.

Поскольку некоторые из указанных функций имеют разрывы, интегрирование системы дифференциальных уравнений (2) целесообразно выполнять численным методом. В качестве расчётного метода после анализа популярных методов численного интегрирования был выбран метод Эйлера, так как он позволяет добиться приемлемой точности при сравнительно простой реализации.

Отдельного внимания заслуживает функция моделирования работы поглощающего аппарата. В исследовании реализовано два подхода к моделированию. Согласно первому подходу, применяемому для моделирования работы пружинно-фрикционных и резиноталлических аппаратов, силовая характеристика поглощающего аппарата разделяется на характерные участки (рисунок 2).

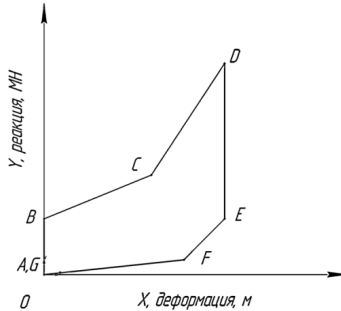


Рисунок 2 – Обобщённая силовая характеристика поглощающего аппарата

В общем случае значение реакции на произвольном участке 1-2 может быть определено согласно следующему выражению:

$$R_{12} = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1), \quad (8)$$

где R_{12} – реакция в пружинно-фрикционном аппарате на участке 1-2, МН;

y_1, y_2 – соответственно значение реакции в начале и в конце участка 1-2, МН;

x_1, x_2 – соответственно значение деформации межвагонной связи в начале и в конце участка 1-2, м;

x – значение деформации межвагонной связи в произвольной точке в границах участка 1-2, м.

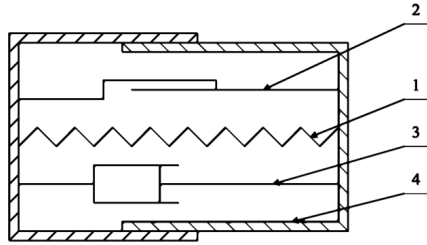
Математическое выражение для случая полного закрытия аппарата имеет следующий вид:

$$R_{x > x_{max}} = y_D + \alpha \cdot (x - x_D), \quad (9)$$

где $R_{x > x_{max}}$ – реакция в пружинно-фрикционном аппарате в случае его закрытия, МН;

α – продольная жёсткость рамы вагона, МН/м.

Моделирование работы эластомерного поглощающего аппарата производится согласно математической модели, основанной на расчётной схеме (рисунок 3).



- 1 – имитация упругой части свойств рабочего органа аппарата;
 2 – имитация сухого трения при деформации аппарата;
 3 – имитация вязкого трения при деформации аппарата;
 4 – защитная оболочка аппарата

Рисунок 3 – Расчётная схема эластомерного поглощающего аппарата

Расчётная формула, соответствующая математической модели эластомерного поглощающего аппарата, будет иметь следующий вид:

$$R_a = R_0 + cx_a \pm F_{тр} \pm \beta V_a^2, \quad (10)$$

где R_a – искомая реакция в автосцепке, МН;

R_0 – величина усилия начальной затяжки, МН;

c – жесткость рабочего органа аппарата при сжатии, МН/м;

x_a – деформация аппарата, м;

$F_{тр}$ – силы сухого трения в аппарате, МН;

β – коэффициент вязкого трения рабочего органа аппарата, кг/м;

V_a – первая производная от деформации аппарата по времени, м/с.

На основе данных натурных испытаний, а также имеющихся в распоряжении автора параметров в расчётную программу были включены 10 типов поглощающих аппаратов (таблица 1).

Таблица 1 – Поглощающие аппараты, включённые в расчётную программу

Модель аппарата	Сила закрытия аппарата, МН	Предельный ход, см	Энергоёмкость, кДж	Поглощаемая энергия, кДж	Класс аппарата
73-ZW	0,85	90	110	35	T-2
73-ZW-Y2	1,85	120	140	45	T-3
P-2П	1,3	70	25	8	T-0
P-5П	1,2	80	50	15	T-0
Ш-2-В	2	90	65	20	T-0
Ш-6-ТО-4	2,5	120	90	30	T-0
Ш-1-ТМ	3	70	50	15	T-0
ПГФ-4	2	120	80	25	T-0
ПМК-110А	2	110	60	20	T-1
АПЭ-120И	1,65	120	150	50	T-3

В третьем разделе осуществлена программная реализация созданной модели, разработаны основные расчётные алгоритмы. Для реализации типового функционала программы (показ диалоговых окон, ввод исходных данных и др.) использованы библиотечные компоненты среды C++ Builder. Разработан интерфейс главного меню.

Основной расчётный блок программы состоит из двух циклов. Во внутреннем цикле выполняется расчёт составляющих продольной и вертикальной реакции в автосцепках каждого вагона с учётом действующих на него сил тяги или торможения. Определяется сопротивление движению вагона и реакции в рессорных комплектах тележек, возникающие в результате возмущений от неровностей пути. Влияние силы тяжести на вычисляемые значения учитывается в специальной функции градиента. Для моделирования процессов тяги, торможения, а также переходного процесса с тяги на торможение предусмотрены специальные булевы переменные. Во внутреннем цикле располагается подпрограмма поиска максимума составляющих реакций, координат максимумов и номеров вагонов, в сцепках которых найденные максимумы были достигнуты. Определяются координаты, скорости и составляющие ускорения каждого вагона.

Внешний цикл отвечает за выполнение процесса во времени. На каждом шаге интегрирования время процесса увеличивается на заданную величину, а величины координат и скоростей, полученные на предыдущем шаге интегрирования во внутреннем цикле, присваиваются соответствующим значениям скорости и ускорения текущего шага.

Алгоритм работы пружинно-фрикционного и резинометаллического аппарата (рисунок 4) составлен, основываясь на наборе условий, описывающих график ломанной линии, построенной по узловым точкам рисунка 2.

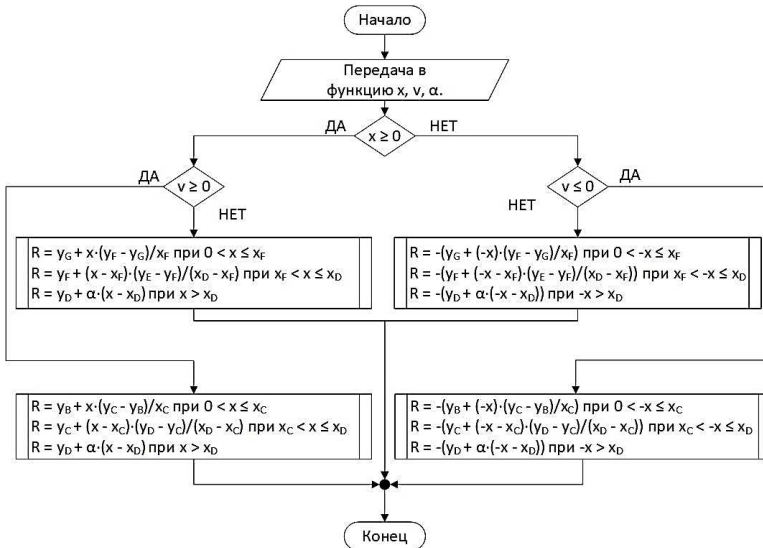


Рисунок 4 – Алгоритм расчёта реакции пружинно-фрикционного и резинометаллического аппарата

Конкретные значения точек получены в результате аппроксимации опытной силовой характеристики аппаратов различных типов. Наборы условий упрощены с учётом совпадения некоторых точек. Похожий вид имеет алгоритм функции вычисления реакции в эластомерном поглощающем аппарате за исключением того,

что в его ветвях расчёт реакции выполняется согласно математической модели (10).

Основная форма программы состоит из нескольких окон и полей вывода данных, а также из меню кнопок, реализованного в виде библиотечного объекта MainMenu среды C++ Builder (рисунок 5).

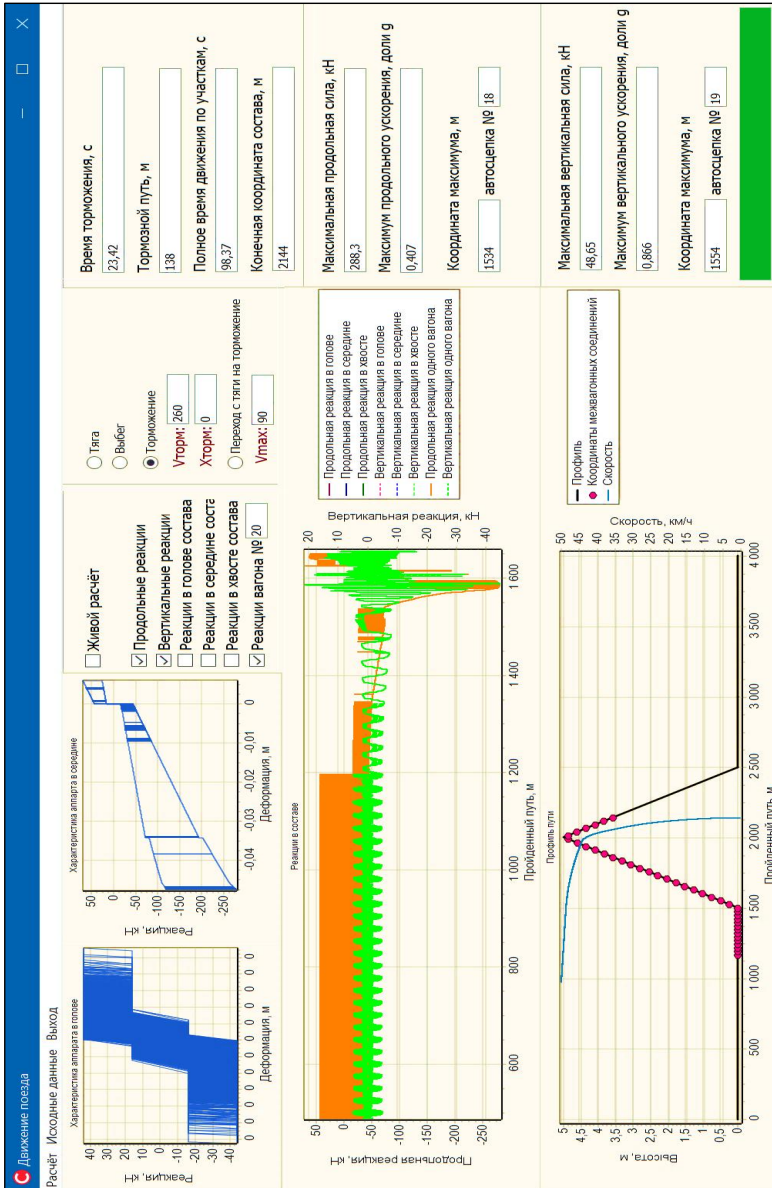
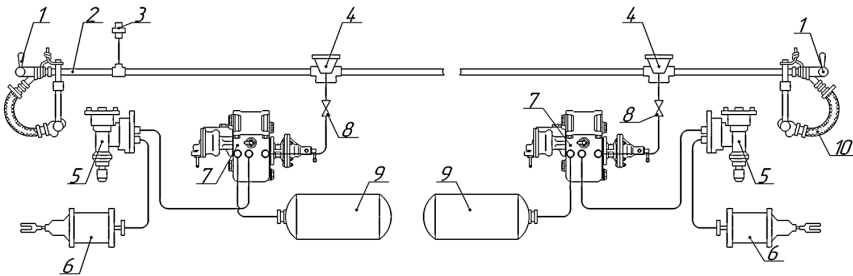


Рисунок 5 – Главная форма созданной программы

В правой части главной формы программы выводятся характеристики, которые вычисляются по завершению процесса движения состава по перегону. К ним относятся полное время движения по участкам, конечная координата состава, тормозной путь, время торможения и параметры, характеризующие возникшие максимумы составляющих межвагонной реакции в составе. Созданная программа может быть использована на системах с ОС Windows с разрядностью x32, x64, x86 неограниченным кругом пользователей для проведения широкого спектра экспериментов по численному моделированию движения состава. В данной работе программа была использована для оценки уровней составляющих межвагонных реакций при торможении.

В четвертом разделе была выдвинута гипотеза о наличии влияния числа воздухораспределителей состава на скорость распространения тормозной волны. Для подтверждения гипотезы был проведён натурный эксперимент с лабораторным оборудованием кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство». Результаты эксперимента подтверждают гипотезу, полученные поправки к скорости распространения тормозной волны были внесены в программу. Учитывая результаты эксперимента, была предложена новая схема тормозного оборудования грузового вагона, характеризующаясь повышенными по сравнению с типовой схемой значениями скорости распространения тормозной волны (рисунок 6).



1 – концевой кран; 2 – тормозная магистраль; 3 – стоп-кран; 4 – тройник-пылеловка;
5 – авторежим; 6 – тормозной цилиндр; 7 – грузовой воздухораспределитель; 8 – кран
разоблицельный; 9 – запасный резервуар; 10 – рукав соединительный

Рисунок 6 – Предлагаемая схема тормозного оборудования грузового вагона

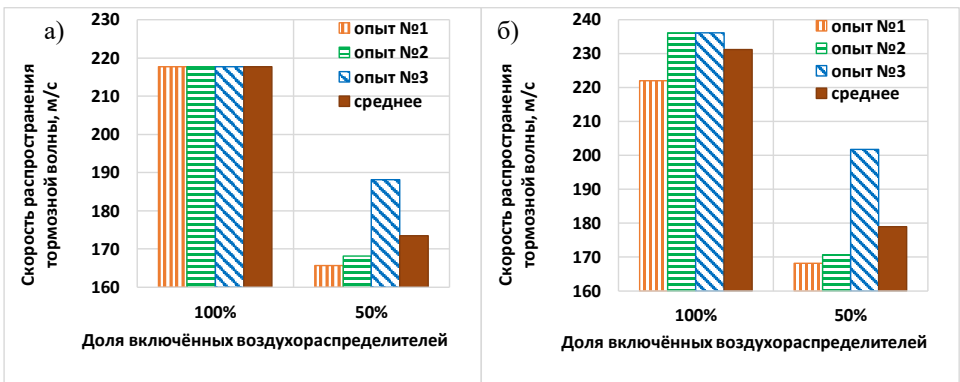
Сущность предлагаемой модернизации заключается в установке двух воздухораспределителей на один вагон в дополнение к существующей схеме потележечного торможения. Тогда при торможении вагона в составе поезда его отдельный участок магистрали будет дважды подвергаться дополнительной разрядке, что приведет к ускорению скорости распространения тормозной волны. Для подтверждения выдвинутой гипотезы был проведён эксперимент с групповой испытательной станцией кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» РУТ(МИИТ). Полная длина воздухопровода станции составляет 600 м и содержит комплект приборов 20 вагонов, оборудованных автоматическим прямодействующем воздухораспределителем (ВР) №483. Таким образом, имеющаяся система позволяет проводить эксперимент по торможению с учётом числа включенных воздухораспределителей. Изменяя отношение числа воздухораспределителей к длине

трубопровода станции возможно установить зависимость скорости распространения тормозной волны от этого отношения. Учитывая имеющиеся экспериментальные материально-технические мощности кафедры, были проведены несколько серий экспериментов (таблица 2).

Таблица 2 – Исходные данные для эксперимента с тормозной станцией

Доля ВР	Включение ВР на вагоне																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
100 %	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
50 %	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-

На каждый режим включения было проведено три опыта и, с целью уменьшения статистической погрешности, рассчитано среднее значение времени достижения тормозной волны хвостового вагона. Во всех опытах определялось время по сдвигу манометра на хвостовом вагоне. Испытывались режимы полного служебного и экстренного торможения. Значения скорости распространения тормозной волны, определённые с учётом полученных данных и паспортных параметров станции, приведены на рисунке 7.



а – опыты полного служебного торможения; б – опыты экстренного торможения

Рисунок 7 – Зависимость скорости распространения тормозной волны от доли включенных воздухораспределителей в составе

Ограничение по длине тормозной магистрали испытательной станции и количеству воздухораспределителей, связанное с габаритами лаборатории, в которой находится оборудование, потребовало проведения процедуры линейной интерполяции для получения значений, соответствующих удвоенному числу воздухораспределителей на составе (40 вагонов на длине 600 м – стандартный грузовой поезд). Итоговые результаты серии экспериментов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты линейной интерполяции экспериментальных данных

Процент включения ВР в тормозной системе		Скорость распространения тормозной волны, м/с
100 %	ПСТ	272
	ЭТ	289
50 %	ПСТ	216
	ЭТ	223

Экспериментальные данные были успешно верифицированы расчетами с использованием эмпирических формул и результатов ранее проведенных натурных испытаний. Результаты натурного эксперимента подтверждают гипотезу о влиянии числа воздухораспределителей на скорость распространения тормозной волны. Установлено, что применение удвоенного числа воздухораспределителей на грузовом вагоне (по одному прибору на каждую тележку четырёхосного вагона) увеличивает скорость распространения тормозной волны по длине состава на 20 % для режима полного служебного и на 23 % для режима экстренного торможения. Полученные значения были использованы в созданной программе для оценки влияния предлагаемой конфигурации тормозной системы вагона на величину межвагонных реакций.

В пятом разделе были проведены серии экспериментов по численному моделированию процесса торможения составов грузовых вагонов на участках с переломным профилем. Исследовалось движение составов различных конфигураций с включением порожних и малозагруженных вагонов в опасные места при благоприятных и неблагоприятных условиях торможения при различных скоростях распространения тормозной волны. На основе анализа критериев безопасности движения определены предельные уровни продольной и вертикальной силы на автосцепке. Результаты моделирования проанализированы с учётом установленных критических значений сил. Приведён перечень практических рекомендаций по предотвращению выжимания порожних и малозагруженных вагонов в грузовых поездах.

В исследовании проводилась оценка влияния скорости распространения тормозной волны на величины составляющих межвагонной реакции при торможении составов полувагонов (таблица 4) и длиннобазных платформ (таблица 5) с включением порожних и малозагруженных вагонов в среднюю часть поезда.

Таблица 4 – Конфигурация состава полувагонов в опытах моделирования

№ группы	1	2	3
Тип вагона	Полувагон	Платформа	Полувагон
Загрузка, т	78	0 (39)	78
Тара, т	22	21	22
Масса тележки, т	9,6	9,6	9,6
Момент инерции, т·м ²	1000	1000	1000
Высота центра тяжести, м	1,8	1,8	1,8
База, м	8,65	9,72	8,65
Консоль, м	1,5	1,5	1,5
Поглощающий аппарат	ПМК-110	Р-5П	ПМК-110
Число вагонов в группе	42	1	43
Масса состава, кг	8521		
Длина состава, м	1003		

Примечание – значения параметров в скобках соответствуют случаям частичной загрузки вагонов

Число вагонов было подобрано таким образом, чтобы обеспечить одинаковую длину для обоих составов. Масса состава полувагонов в 2,5 раза превышает массу состава длиннобазных платформ. В опытах первой группы был исследован процесс торможения составов при штатных условиях, начинавшийся после выхода

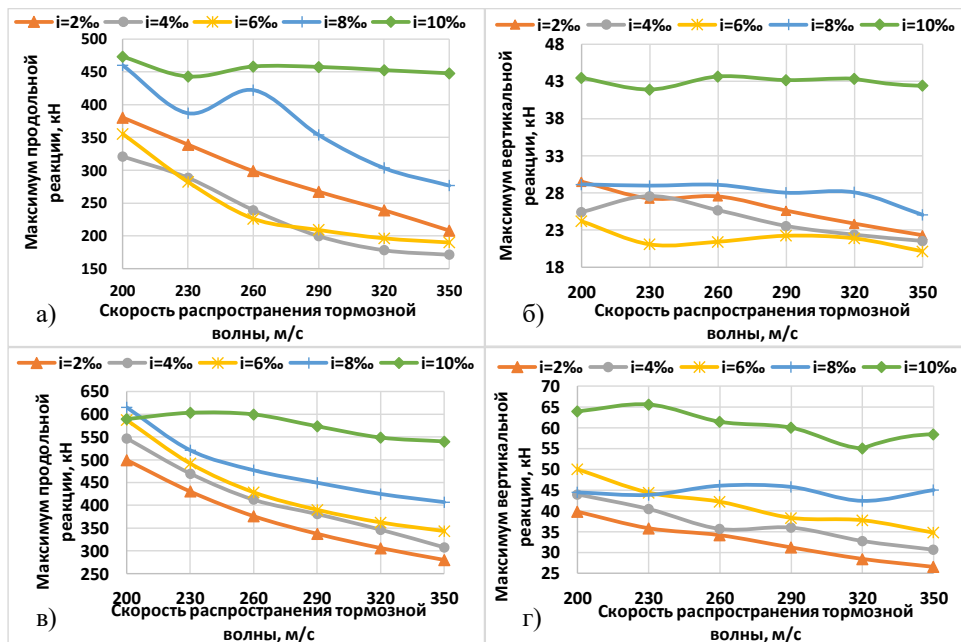
хвостового вагона с начального участка. Виды профиля пути показаны на рисунке 9.

Таблица 5 – Конфигурация состава длиннобазных платформ в опытах моделирования

№ группы	1	2	3
Тип вагона	Длиннобазная платформа	Длиннобазная платформа	Длиннобазная платформа
Загрузка, т	62	0 (31)	62
Тара, т	24	24	24
Масса тележки, т	9,6	9,6	9,6
Момент инерции, т·м ²	1000	1000	1000
Высота центра тяжести, м	1,3	1,3	1,3
База, м	19,7	19,7	19,7
Консоль, м	3,01	3,01	3,01
Поглощающий аппарат	P-5П	P-5П	P-5П
Число вагонов в группе	19	1	19
Масса состава, кг	3905		
Длина состава, м	1003		

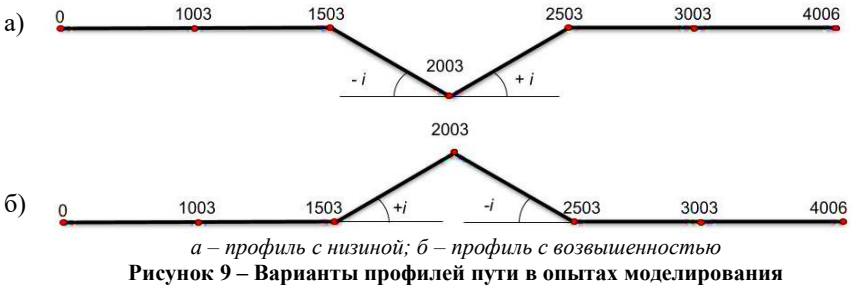
Примечание – значения параметров в скобках соответствуют случаям частичной загрузки вагонов

Характер максимумов составляющих реакции, полученных при моделировании торможения состава полувагонов на различных уклонах при разных скоростях распространения тормозной волны, показан на рисунке 8.

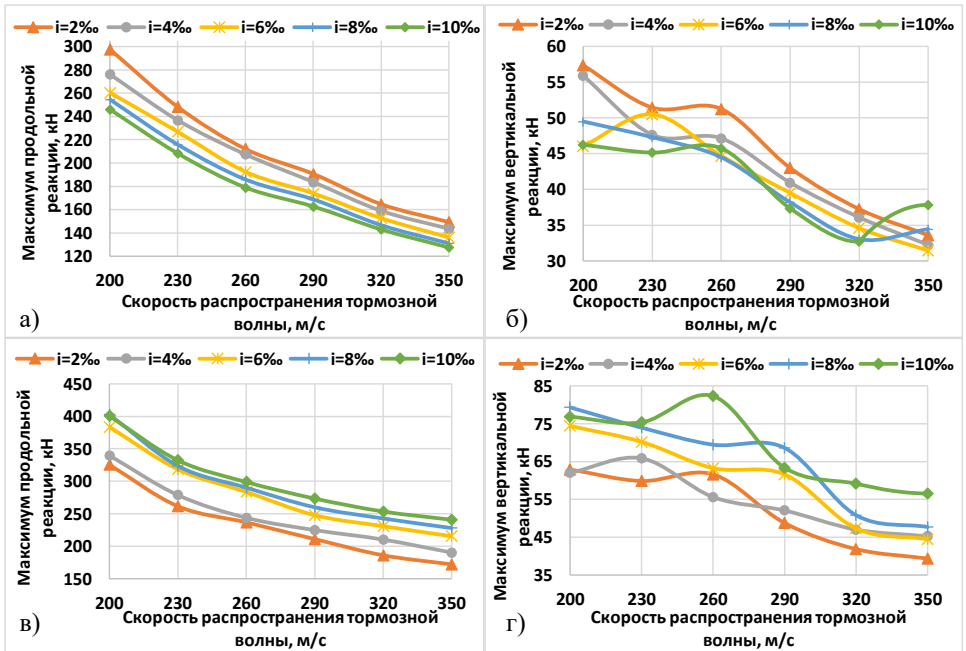


а – профиль с низиной, продольная составляющая; *б* – профиль с низиной, вертикальная составляющая; *в* – профиль с возвышенностью, продольная составляющая; *г* – профиль с возвышенностью, вертикальная составляющая

Рисунок 8 – Максимумы составляющих межвагонной реакции для состава полувагонов



На данном этапе был сделан промежуточный вывод о том, что составляющие реакции падают с ростом скорости тормозной волны, при этом продольная составляющая падает более значительно, чем вертикальная. Результаты аналогичной серии опытов для состава длиннобазных платформ показаны на рисунке 10. Можно отметить, что зависимость составляющих реакции от скорости распространения тормозной волны имеет в данном случае более выраженный характер.



а – профиль с низиной, продольная составляющая; б – профиль с низиной, вертикальная составляющая; в – профиль с возвышенностью, продольная составляющая; г – профиль с возвышенностью, вертикальная составляющая

Рисунок 10 – Максимумы составляющих межвагонной реакции для состава длиннобазных платформ

Данная серия опытов показала, что конструкция современных длиннобазных платформ характеризуется возникновением в их сцепках значительных вертикальных

реакций при сравнительно небольшой массе состава.

Далее было выполнено моделирование процесса торможения составов при неблагоприятных условиях. Неблагоприятными считаются такие условия, при которых достигаются предельно возможные максимумы реакции для конфигурации состава за счёт совпадения ряда негативных факторов. При этом режимы движения в таких условиях были названы критическими. Предварительно были установлены критерии оценки критического режима на предмет возникновения аварии:

$$\begin{cases} P_z < P_{z\text{крит}} = \frac{P_k \cdot L_2 + P_{гр} \cdot L_2}{(L_k + L_1 + L_2)}, \\ P_x < P_{x\text{крит}} = 1000 \text{ кН} \end{cases} \quad (11)$$

где P_z – вертикальная составляющая межвагонной реакции;

$P_{гр}$ – вес перевозимого груза;

P_k – вес кузова вагона без учёта массы тележек;

L_k – длина консоли вагона;

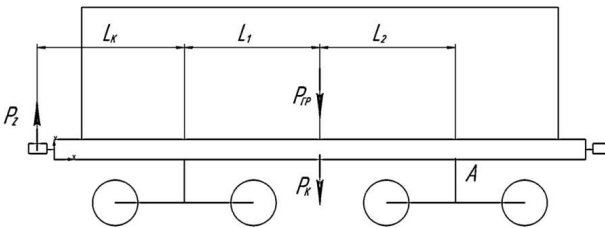
L_1 – длина первой полубазы вагона;

L_2 – длина второй полубазы вагона;

A – точка поворота при выжимании;

P_x – продольная составляющая межвагонной реакции.

Второе условие системы (11) основано на значении III расчётного режима норм для расчёта и проектирования вагонов железных дорог. Опираясь на данное значение, можно утверждать, что, если в процессе моделирования движения поезда возникшие максимумы реакций в конструкции вагонов не превысили значения, на которые эти конструкции были рассчитаны при проектировании, то движение прошло в штатном режиме. В противном случае не существует гарантий конструктора и изготовителя на стабильную и безопасную работу вагона в превышенном диапазоне физических параметров. Первое условие системы (11) было выбрано исходя из расчётной схемы, учитывающей механизм подъёма кузова вагона вертикальной составляющей межвагонной реакции (рисунок 11).



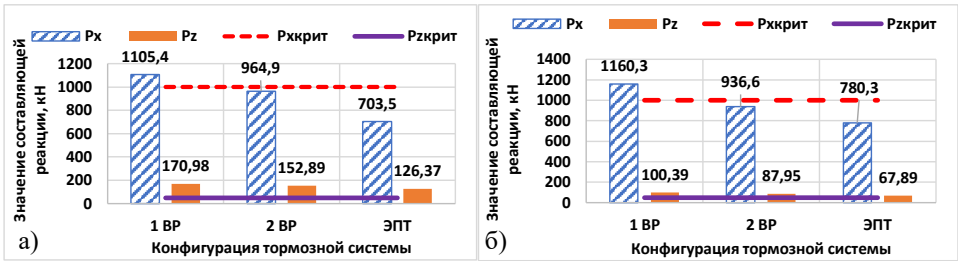
P_z – вертикальная составляющая межвагонной реакции; $P_{гр}$ – вес перевозимого груза; P_k – вес кузова вагона без учёта массы тележек; L_k – длина консоли вагона; L_1 – длина первой полубазы вагона; L_2 – длина второй полубазы вагона; A – точка поворота при выжимании

Рисунок 11 – Схема подъёма кузова вагона в статике

Поскольку все параметры первого уравнения определяются из исходных данных, то система (11) может быть использована для определения граничного значения вертикальной силы, превышение которого может привести к аварии.

Для нахождения критического режима было проведено множество

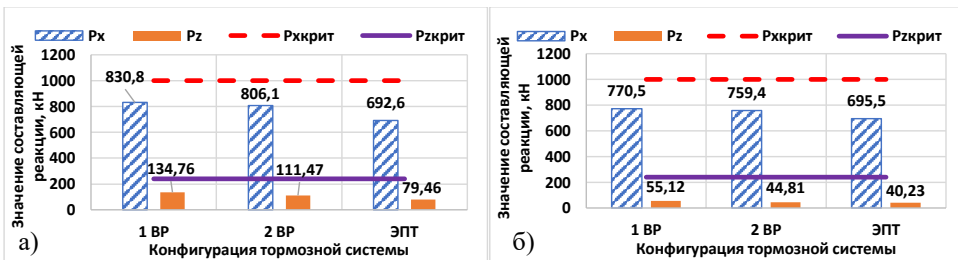
экспериментов, в которых варьировалась координата начала торможения, величина уклона и другие параметры. После отыскания критического режима эксперимент повторялся с учётом значений скорости распространения тормозной волны, соответствующих применению на вагоне схемы с двумя воздухораспределителями и схемы применения электропневматического тормоза (ЭПТ). В результате были получены результаты, часть из которых приведена на рисунке 12.



а – профиль с низиной; б – профиль с возвышенностью

Рисунок 12 – Максимумы составляющих межвагонной реакции критических режимов для состава полувагонов с порожней платформой

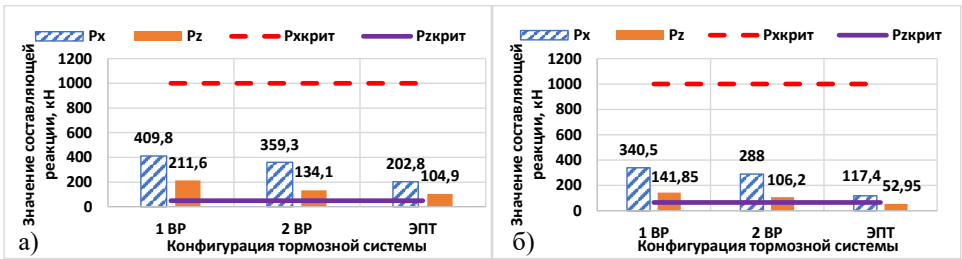
Полученные данные подтверждают эффективность применения тормозной системы с двумя воздухораспределителями. Можно сделать вывод, что для состава полувагонов при критической ситуации эксплуатация вагонов с двумя воздухораспределителями позволит не допустить превышения критической продольной силы, однако условия по вертикальной силе не соблюдается. Применение ЭПТ позволит более эффективно минимизировать риски. Результаты аналогичных опытов для исследования случая включения полупорожней платформы в середину состава не характеризуются возникновением аварии (рисунок 13).



а – профиль с низиной; б – профиль с возвышенностью

Рисунок 13 – Максимумы составляющих межвагонной реакции критических режимов для состава полувагонов с полупорожней платформой

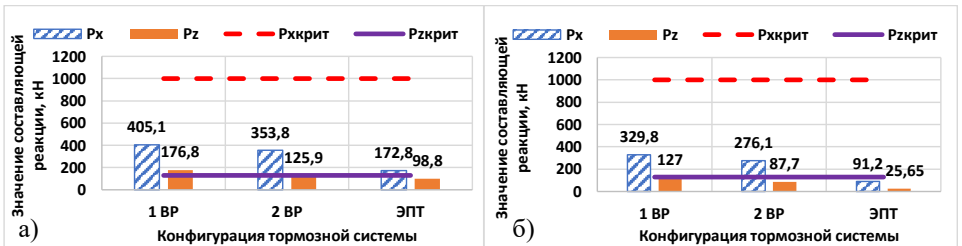
Подобным образом были установлены критические режимы для состава длиннобазных платформ. Результаты для случаев включения порожней платформы в середину состава показаны на рисунке 14. Можно отметить, что величина продольных сил находится в допустимых пределах с большим запасом, однако вертикальные силы чрезмерно высоки и выкатка тележки порожней платформы будет неизбежна в реальных условиях, соответствующих эксплуатационным. Только применение ЭПТ для случая рисунка 14 б не характеризуется аварией.



а – профиль с низиной; б – профиль с возвышенностью

Рисунок 14 – Максимумы составляющих межвагонной реакции критических режимов для состава длиннобазных платформ с порожней платформой

Проведенная серия опытов была повторена для исследования случая включения полупорожней платформы. Для моделирования частичной загрузки платформы одним порожним и одним груженым контейнерами в модели было предусмотрено смещение центра тяжести. Из результатов опыта, представленных на рисунке 15, следует, что применение перспективной тормозной конфигурации (рисунок 6) позволит избежать выжимания полупорожней платформы при неблагоприятном стечении факторов.



а – профиль с низиной; б – профиль с возвышенностью

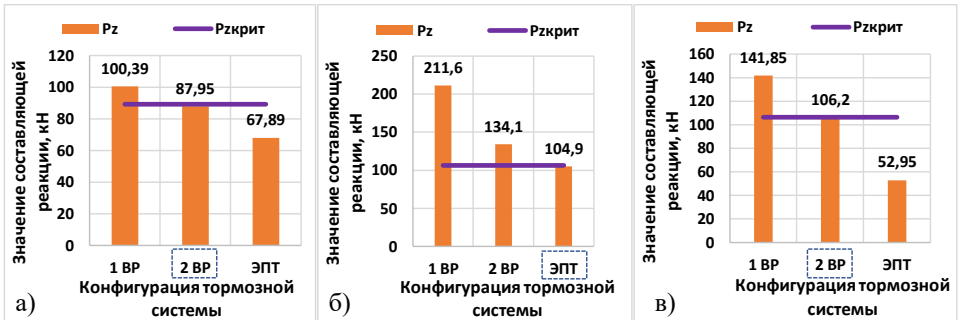
Рисунок 15 – Максимумы составляющих межвагонной реакции критических режимов для состава длиннобазных платформ с полупорожней платформой

При этом исследуемый вариант загрузки вагона (загрузка одним порожним и одним груженым контейнерами) очень часто встречается на практике. Следовательно, можно сделать вывод, что внедрение новой системы тормозного оборудования в конструкцию длиннобазных контейнерных платформ необходимо для обеспечения безопасности движения. Стоит отметить, что критический уровень вертикальной составляющей реакции можно повысить, если предусмотреть полужесткую связь кузова с тележкой вагона. Указанное может быть достигнуто применением замкового шкворня в конструкции тележки или путём добавления полужёсткой связи кузова вагона с тележкой через петли, крепящиеся к боковым балкам рамы. Тогда в уравнение моментов первого условия системы (11) войдёт вес тележки и формула примет новый вид:

$$P_{Z\text{крит}} = \frac{P_k \cdot L_2 + P_{гр} \cdot L_2 + P_T \cdot (L_1 + L_2)}{(L_k + L_1 + L_2)}, \quad (12)$$

где P_T – вес тележки вагона, кН.

Указанное позволит пересчитать критические уровни реакций и по-новому проанализировать полученные данные опытов моделирования критических режимов в отношении вертикальной составляющей межвагонной реакции. Далее приводятся только те из них, которые стали удовлетворять обновленному диапазону безопасности для вертикальной силы (рисунок 16). Пунктиром отмечены результаты опытов для конфигураций тормозной системы, попавшие в новые границы допустимых значений вертикальной силы на автосцепке, вычисленные с помощью уравнения (12). С учётом повышенного уровня критической силы в допустимые границы попало несколько новых случаев из числа проведённых экспериментов, соответствующих конфигурациям составов с включением порожних вагонов в среднюю часть. Указанное улучшение также снижает риски и для других случаев, поскольку способствует расширению допустимого диапазона вертикальной силы.



а – состав полувагонов с порожней платформой, случай торможения на возвышенности;

б – состав длиннобазных платформ с порожней единицей, случай торможения на низине;

в – состав длиннобазных платформ с порожней единицей, случай торможения на возвышенности

Рисунок 16 – Максимумы вертикальной реакции критических режимов с учётом повышенного критического уровня

Из приведённых графиков следует, что при сочетании улучшения тормозной системы путём применения на вагонах схемы с двумя воздухораспределителями и добавления полужёсткой связи тележки с кузовом, условия для обеспечения безопасности движения значительно улучшаются. Приведённая модернизация особенно актуальна для состава длиннобазных платформ. Кроме того, полученные результаты опытов данного раздела делают внедрение электропневматического тормоза на грузовой подвижной состав актуальной задачей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Проведён анализ методов решения задач динамики вагонов. По результатам анализа в качестве основного метода исследования был принят и успешно применён метод математического и компьютерного моделирования.

2 Предложена математическая модель движения грузового вагона в поезде, учитывающая уклон и неровности пути, внешние силы, действующие на систему при переходных режимах и смещение центра тяжести вагона вследствие неравномерной загрузки. С помощью среды программирования Embarcadero C++ Builder на основе математической модели создана компьютерная программа, которая может быть

использована для исследования продольной динамики поезда.

3 Проведён натурный эксперимент по оценке влияния числа воздухораспределителей состава на скорость распространения тормозной волны и выполнена успешная верификация его результатов, что служит доказательством эффективности предложенной схемы конфигурации тормозной системы, повышающей скорость распространения тормозной волны по длине состава и предусматривающей установку двух воздухораспределителей на грузовой вагон.

4 Проведена серия экспериментов по имитационному моделированию торможения состава грузовых вагонов при различных значениях исходных данных, соответствующих благоприятным и неблагоприятным условиям эксплуатации. Полученные результаты свидетельствуют о существенном снижении межвагонных реакций при включении в модель параметров процесса торможения, соответствующих перспективным конфигурациям тормозной системы грузовых поездов, ускоряющих скорость распространения тормозной волны по длине состава.

5 Проанализирован процесс выжимания порожних и малозагруженных вагонов под действием продольных сил, описан механизм выжимания, обоснованы критические уровни горизонтальной и вертикальной составляющей межвагонных реакций, приводящие к возникновению аварии.

6 Сформирован перечень практических рекомендаций по повышению плотности тормозной магистрали грузового поезда для повышения скорости распространения тормозной волны по длине состава.

7 Выполнено научное обоснование актуальности разработки и внедрения системы электропневматического тормоза на грузовом подвижном составе, основой которого являются результаты проведённых опытов по численному моделированию.

8 Рекомендуются применение предложенной пневматической системы тормоза грузового вагона на длиннобазных платформах совместно с использованием замковых шкворней в узле соединения кузова с тележкой, что позволит существенно повысить безопасность движения составов вагонов данного типа при переходных режимах движения за счёт снижения риска выжимания порожних и малозагруженных вагонов.

9 Перспективой дальнейшей разработки темы является повышение детализации математической модели, добавление в расчётную программу блоков вычисления показателей плавности хода, включение в модель эмпирических формул расчёта тормозной силы для пассажирских воздухораспределителей, а также переход от плоской математической модели грузового вагона к пространственной.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях

1 Емельянов, О.Ю. Эксплуатация вагонов со сниженной массой тары в длинносоставных тяжеловесных поездах / О. Ю. Емельянов, О. Ю. Кривич, И. К. Сергеев. – Текст : непосредственный // Научный информационный сборник «Транспорт: наука, техника, управление». – 2022. – № 10 – С. 28-33.

2 Кривич, О. Ю. Исследование ходовых качеств вновь создаваемых вагонов со сниженным значением массы тары путем компьютерного моделирования динамики состава / О. Ю. Кривич, И. К. Сергеев, О. Ю. Емельянов. – Текст :

непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 2. – С. 14-17.

3 Сергеев, И. К. Обзор исследований и программных комплексов для решения задач динамики подвижного состава / И. К. Сергеев, С. В. Беспалько. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 1. – С. 45-50.

б) в других научных изданиях и материалах конференций

4 Сергеев, И. К. Математическая модель движения вагона с учётом особенностей строения пути / И. К. Сергеев. – Текст : непосредственный // Современные проблемы железнодорожного транспорта : Сборник трудов по результатам международной интернет-конференции, Москва, 7 апреля 2020 года / Под общей редакцией К.А. Сергеева. – Москва: Российский университет транспорта, 2020. – С. 112-116.

5 Сергеев, И. К. Влияние силы тяги локомотива на вертикальную нагрузку вагона / И. К. Сергеев, О. Ю. Емельянов, Д. В. Ковин. – Текст : непосредственный // Современные проблемы железнодорожного транспорта : Сборник трудов по результатам международной интернет-конференции, Москва, 7 апреля 2020 года / Под общей редакцией К.А. Сергеева. – Москва: Российский университет транспорта, 2020. – С. 117-122.

6 Сергеев, И. К. Анализ современных программных комплексов, применяемых для решения задач динамики вагонов / И. К. Сергеев. – Текст : непосредственный // Современные проблемы железнодорожного транспорта : Сборник трудов по результатам международной интернет-конференции, Москва, 7 апреля 2020 года / Под общей редакцией К.А. Сергеева. – Москва: Российский университет транспорта, 2020. – С. 108-111.

7 Сергеев, И. К. Математическая модель движения состава вагонов по переломному профилю / И. К. Сергеев. – Текст : непосредственный // Наука и техника: новые вызовы современности: Сборник статей VII Международной научно-практической конференции, Москва, 12 апреля 2022 года. – Москва: Научный клуб «Ракета», 2022. – С. 205-211.

8 Сергеев, И. К. Математическая модель движения поезда с учётом переходных режимов движения / И. К. Сергеев. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы науки и техники. Инноватика : Сборник научных статей по материалам IX Международной научно-практической конференции, Уфа, 7 октября 2022 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2022. – С. 45-51.

9 Сергеев, И. К. Общий алгоритм компьютерного моделирования подвижного состава / И. К. Сергеев. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы современной науки и практики : Сборник научных статей по материалам IX Международной научно-практической конференции, Уфа, 27 сентября 2022 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2022. – С. 59-64.

10 Филиппов, В.Н. Пути повышения пожаровзрывобезопасности эксплуатации цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов / В. Н. Филиппов, Г. И. Петров, Ю. Н. Шебеко, И.К. Сергеев. – Текст : непосредственный // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т. 29. – № 6. – С. 75-83.

Сергеев Иван Константинович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ СИЛ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОРОЖНИХ И МАЛОЗАГРУЖЕННЫХ ВАГОНОВ В
ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДАХ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «__» _____ 2022 г. Формат бумаги 60x90¹/16

Объем 1,5 усл.п.л Тираж 80 экз. Заказ №

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр.9