

На правах рукописи



Чистяков Эдуард Юрьевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С
ОБЪЕКТАМИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С УЧЕТОМ
ИНТЕНСИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ БОКОВОГО ВЕТРА**

Специальность 2.9.3 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС) на кафедре «Наземные транспортно-технологические комплексы».

Научный руководитель: **Воробьев Александр Алфеевич**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Наземные
транспортно-технологические комплексы»
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I».

Официальные оппоненты: **Беспалько Сергей Валерьевич**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Вагоны и вагонное
хозяйство» ФГАОУ ВО «Российский
университет транспорта», г. Москва.

Бакланов Александр Алексеевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Подвижной состав электрических
железных дорог» ФГБОУ ВО «Омский
государственный университет путей
сообщения», г. Омск

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Дальневосточный
государственный университет путей
сообщения» (ФГБОУ ВО ДВГУПС),
г. Хабаровск.

Защита состоится «05» февраля 2026 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 44.2.005.03 на базе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, город Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2 (главный корпус, читальный зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, город Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2, а на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан « » декабря 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 44.2.005.03
доктор технических наук, профессор

В.А. Финоченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Развитие сети скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралей неразрывно связано с вопросами обеспечения безопасности движения поездов в зонах с повышенными ветровыми нагрузками. Наличие значительных открытых пространств при пересечении широких рек, движении подвижного состава вдоль прибрежной полосы по мостовым и эстакадным конструкциям ферменного и балочного типа в условиях сильного бокового ветра может привести к перераспределению веса по осям колесных пар ходовых тележек. Аналогичные эксплуатационные проблемы возникают при прохождении высокоскоростного поезда вблизи искусственных сооружений. Эти проблемы обусловлены интенсивным и переменным силовым воздействием возмущенных воздушных масс на движущийся поезд. Усиление неравномерности перераспределения нагрузок на оси и колесные пары возникает при прохождении мостов и эстакад, поскольку появляются дополнительные воздействия, обусловленные влиянием совместных колебательных процессов мостовых конструкций, ходовой части высокоскоростного подвижного состава, а также рессорного подвешивания. При этом на характер и форму колебаний сопряженных корпусных элементов высокоскоростного подвижного состава оказывают влияние упругие связи между вагонами движущегося поезда. Описанные выше факторы заметно влияют на энергоэффективность высокоскоростного состава в целом и на безопасность движения.

Степень разработанности темы. Теоретическая и методологическая основа диссертации в части аэродинамического взаимодействия, движущегося высокоскоростного подвижного состава с объектами железнодорожной инфраструктуры и искусственных сооружений, базируется на работах ученых ведущих транспортных институтов, а также мировой практике, внедряемой для высокоскоростного движения.

Объект исследования – аэродинамическое взаимодействие высокоскоростного подвижного состава с объектами транспортной инфраструктуры в условиях движения с учетом интенсивного воздействия бокового ветра.

Область исследования – энергоэффективность высокоскоростного подвижного состава в условиях аэродинамического взаимодействия с объектами транспортной инфраструктуры при движении с учетом ускоренно движущихся воздушных масс.

Цель исследования – разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности и безопасности движения, а также уточнение механизма

взаимодействия пары «колесо – рельс» на основе моделирования динамики взаимодействия высокоскоростного подвижного состава и объектов транспортной инфраструктуры в условиях движения с учетом интенсивного воздействия бокового ветра.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе **поставлены и решены следующие задачи:**

1. Разработка цифровых двойников твердотельных моделей высокоскоростного подвижного состава и приближенной периферии (эстакад, ферменных мостовых конструкций) позволяющих более полно определять физику процессов взаимодействия сопряженных элементов, с учетом демпфирующих и жёсткостных свойств элементов транспортной инфраструктуры, и ходовой части высокоскоростного подвижного состава.

2. Разработка динамических моделей взаимодействия мостовых конструкций и высокоскоростного подвижного состава, подверженных воздействию ускоренно движущейся воздушной среды, направленной ортогонально движению состава.

3. Выполнение экспериментальных исследований динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава и мостовых сооружений различных типов и протяженности.

4. Исследование динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с ферменной мостовой конструкцией с учетом демпфирующих свойств элементов конструкции ходовой части поезда и несущей металлоконструкции моста, находящихся под воздействием ускоренно движущихся воздушных масс.

5. Уточнение механизма взаимодействия пары «колесо – рельс» высокоскоростного подвижного состава в условиях интенсивного аэродинамического сопротивления.

6. Разработка рекомендаций по повышению безопасности движения на основе анализа взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с искусственными сооружениями транспортной инфраструктуры в условиях движения при интенсивном воздействии бокового ветра.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработана уточненная динамическая модель аэродинамического взаимодействия в системе «подвижной состав – искусственное сооружение транспортной инфраструктуры», с учетом энерго – массообмена на диффузорно – конфузорных участках.

2. Изучены особенности перераспределения веса подвижного состава по

осям колесных пар ходовых тележек под воздействием турбулентных воздушных потоков, образующихся при совместном воздействии бокового ветра и инерционного наддува увлеченной воздушной среды от движения поезда в пространстве «подвижной состав – искусственное сооружение транспортной инфраструктуры».

3. Разработана уточненная модель взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с искусственными сооружениями в условиях движения при интенсивном воздействии ветровой нагрузки, позволяющая более полно учитывать взаимовлияние динамических свойств высокоскоростного подвижного состава, и жесткости искусственных сооружений транспортной инфраструктуры.

4. Сформулированы рекомендации по повышению энергоэффективности и безопасности в системе «подвижной состав – искусственные сооружения» в условиях интенсивного аэродинамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами транспортной инфраструктуры.

5. Предложено устройство для имитации процесса нагружения колеса на рельс, а также программа расчета назначенного срока службы цельнокатаных колес подвижного состава, новизна которых подтверждена патентом на полезную модель № 201861 и свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668716 соответственно.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке научно-обоснованных технических и технологических решений по компенсации влияния аэродинамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с объектами транспортной инфраструктуры в условиях интенсивного воздействия бокового ветра.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. На основе результатов физического эксперимента построена и верифицирована математическая модель, описывающая процесс аэродинамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами транспортной инфраструктуры.

2. Разработана методика численного эксперимента, позволяющая проводить уточненные расчеты условий взаимодействия высокоскоростного подвижного состава, с учетом динамики подвижного состава, податливости путевых сооружений типа ферменный мост, и воздействию на корпусные элементы состава поезда ускоренно движущихся воздушных масс.

3. Разработана методика проведения натурных испытаний динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава при

прохождении мостовых сооружений.

4. Предложены технологические решения и разработаны рекомендации, позволяющие повысить безопасность и скорость движения за счет более полного использования потенциала взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с объектами транспортной инфраструктуры в условиях повышенных ветровых аэродинамических нагрузок.

Методология и методы исследования. Исследования аэродинамического взаимодействия, движущегося высокоскоростного подвижного состава и искусственных сооружений, выполнялись с использованием методов численного моделирования и разработки математических моделей на основе метода конечных объемов для моделирования аэродинамического взаимодействия в системе «подвижной состав – искусственное сооружение транспортной инфраструктуры». Для моделирования турбулентного течения применена k-ε модель и использованы осредненные уравнения Навье-Стокса. В теоретических исследованиях использованы особенности структуры распределения турбулентных воздушных потоков в пространстве «подвижной состав – искусственное сооружение». Анализ механических процессов при анализе взаимодействия движущегося подвижного состава с мостовыми сооружениями, а также анализ колебательных процессов в системе движущийся «поезд – мост» производился с применением программного комплекса SolidWorks FlowSimulation, а анализ полученных данных произведен методами статистической обработки результатов численного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Уточненная динамическая модель аэродинамического взаимодействия в системе «подвижной состав – искусственное сооружение транспортной инфраструктуры», с учетом энерго-массообмена на диффузорно-конфузорных участках.

2. Модель распределения веса подвижного состава по осям колесных пар ходовых тележек под воздействием турбулентных воздушных потоков, образующихся при слиянии бокового ветра и инерционного наддува увлеченной воздушной среды от движения поезда в пространстве «подвижной состав – искусственное сооружение транспортной инфраструктуры».

3. Результаты исследования динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с ферменной мостовой конструкцией с учетом податливости элементов подвесок поезда и несущей металлоконструкции моста, находящихся под воздействием ускоренно движущихся воздушных масс.

4. Численная модель взаимодействия элементов кинематической пары «колесо – рельс» с учетом распределения веса подвижного состава по осям

колесных пар тележек и динамического отклика упруго - податливой подвески ходовых устройств и упругих связей корпусных элементов состава поезда.

Степень достоверности. Достоверность приведенных результатов проделанной работы подтверждена сходимостью теоретических и экспериментальных данных исследований и обоснованностью принятых допущений.

Апробация результатов. Работа выполнялась в федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС) на кафедре «Наземные транспортно-технологические комплексы».

Опытно-экспериментальные исследования проводились на реальном высокоскоростном подвижном составе Velaro RUS («Сапсан») на участке Москва – Санкт-Петербург Октябрьской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

Основные результаты, положения диссертационной работы и предложения по реализации обсуждались на заседаниях кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы», а также на российских и международных конференциях и симпозиумах.

Публикации. Основные положения диссертационной работы и научные результаты опубликованы в 16 печатных работах, из них 12 – в рецензируемых изданиях, включенных в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов диссертационных работ и приравненных к ним, одной монографии, получены один патент на полезную модель и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад заключается в получении основных научных результатов при исследовании аэродинамического взаимодействия в системе «подвижной состав – искусственное сооружение транспортной инфраструктуры», с учетом энерго-массообмена на диффузорно-конфузорных участках, а также рекомендаций по повышению энергоэффективности и безопасности работы в условиях интенсивного аэродинамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами транспортной инфраструктуры, в частности:

– в анализе отечественного и зарубежного научного опыта в области исследования взаимодействия пары «колесо-рельс» в условиях аэродинамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с объектами транспортной инфраструктуры в условиях движения при интенсивном воздействии бокового ветра;

- в построении усовершенствованной математической модели, описывающая процесс аэродинамического взаимодействия в системе «подвижной состав – искусственное сооружение транспортной инфраструктуры»;
- в разработке методики численного эксперимента, позволяющей проводить уточненные расчеты взаимодействия высокоскоростного подвижного состава и объектов транспортной инфраструктуры, с учетом динамики подвижного состава, податливости путевых сооружений типа ферменный мост, и воздействии на корпусные элементы ускоренно движущихся воздушных масс;
- в разработке модели распределения веса подвижного состава по осям колесных пар ходовых тележек под воздействием турбулентных воздушных потоков, образующихся при слиянии бокового ветра и инерционного наддува увлеченной воздушной среды от движения поезда в пространстве «подвижной состав – искусственное сооружение транспортной инфраструктуры»;
- в получении результатов экспериментального исследования динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с ферменной мостовой конструкцией с учетом податливости элементов подвесок поезда и несущей металлоконструкции моста, находящихся под воздействием ускоренно движущихся воздушных масс;
- в разработке рекомендаций, позволяющих повысить безопасность и скорость движения высокоскоростного подвижного состава за счет более полного использования потенциала взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с объектами транспортной инфраструктуры в условиях повышенных ветровых аэродинамических нагрузок.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационное исследование проведено в соответствии с паспортом специальности ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 2.9.3 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация, и соответствует следующим разделам «Области исследования» паспорта специальности: п. 1 «Эксплуатационные характеристики и параметры подвижного состава и систем тягового электроснабжения, повышение их эксплуатационной надёжности и работоспособности. Системы электроснабжения железных дорог, промышленного железнодорожного транспорта, рельсового городского транспорта и метрополитенов. Методы и средства снижения энергетических потерь, обеспечения энергетической безопасности тяги поездов и электроснабжения железных дорог»; п.6 «Улучшение динамических и прочностных качеств подвижного состава.

Взаимодействие подвижного состава и пути. Снижение износа элементов пути и ходовых частей подвижного состава. Повышение безопасности движения, обеспечение работоспособности ходовых частей подвижного состава»; п.7 «Тяговые и тормозные расчёты. Тяговые и тормозные качества подвижного состава. Обеспечение безопасности движения подвижного состава».

Объем и структура работы. Диссертационная работа включает в себя введение, четыре главы, заключение и изложена на 189 страницах машинописного текста, содержит 38 таблиц, 64 рисунка, 1 приложение. Список цитируемой литературы содержит 100 источников, в том числе 16 работ автора единолично и с соавторами.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность рассматриваемой проблемы и представлены основные научные положения, определяющие предмет диссертационной работы.

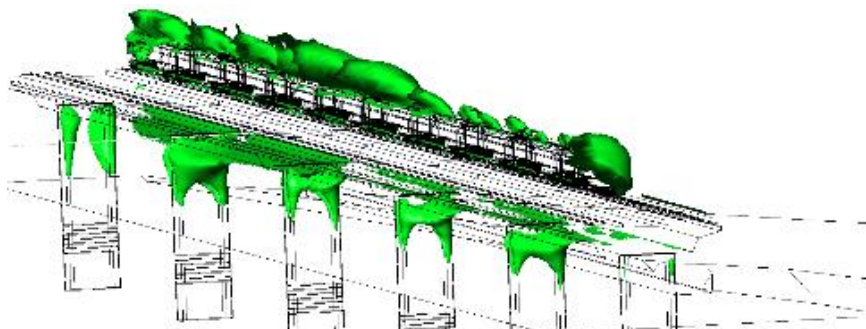
В первой главе выполнен аналитический обзор, раскрывающий современное состояние проблемы, сформулирована цель и задачи исследований. Проанализированы методы исследования аэродинамики высокоскоростных поездов. Отмечено, что наиболее эффективным методом исследования аэродинамики высокоскоростных поездов являются методы численного моделирования на базе методов конечных элементов в трехмерной нестационарной постановке, позволяющие выполнять исследования для подвижного состава и искусственных сооружений транспортной инфраструктуры произвольных конструкций при любых начальных условиях, в том числе, недостижимых в условиях реальной эксплуатации.

Показана необходимость адаптации и установления границ применимости существующих методик анализа процессов в контактной паре «колесо – рельс» для условий высокоскоростного движения по мостовым конструкциям с учетом сложных колебательных процессов, обусловленных наличием динамических нагрузок от колебаний движущегося высокоскоростного подвижного состава и мостовой конструкции, а также протеканием процессов аэродинамического взаимодействия с мостовой конструкцией в условиях движения с учетом интенсивного воздействия бокового ветра.

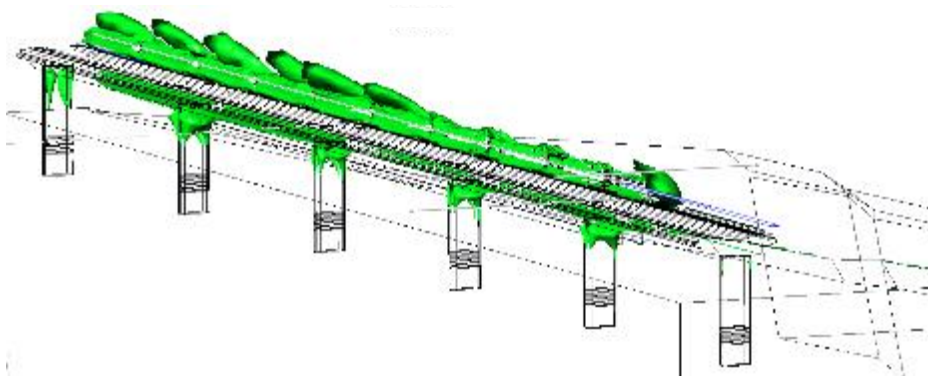
Во второй главе выполнено численное моделирование процесса аэродинамического сопротивления движения высокоскоростного подвижного состава. Разработан алгоритм численного моделирования динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с возмущённой

воздушной средой и объектов транспортной инфраструктуры. Расчет выполнен в квазистационарном режиме для подвижного состава «Сапсан» при его движении (200 – 400 км/ч) по эстакаде и пролетному строению моста ферменной конструкции при воздействии боковых воздушных потоков, характерных для сильного шторма и урагана (по шкале Бофорта): 12 м/с – 6 баллов, 27 м/с – 10 баллов, 36 м/с – 12 баллов

а)



б)



в)

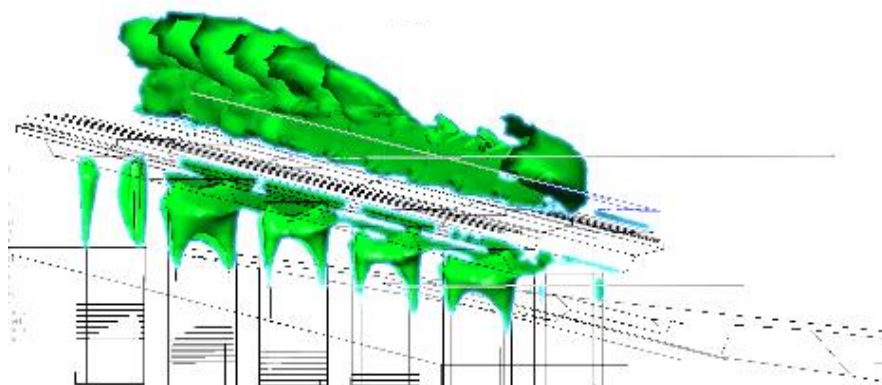


Рисунок 1 – Изоповерхности скоростей воздушных масс, рассчитанные вблизи движущегося подвижного состава, полученные при скорости бокового ветра 27 м/с и скорости поезда 200 км/ч (а), 300 км/ч (б), 400 км/ч (в)

Таким образом установлена картина распределения воздушных потоков вблизи движущегося высокоскоростного подвижного состава и определены величины давлений на его поверхности, обусловленные явлениями инерционного наддува и увлечения воздушной среды движущимся поездом. Выявлено, что образование значительной разницы давлений на наветренной и подветренной

поверхностях кузова вагона обусловлено явлениями сноса срывного потока воздушной среды в направлении хвостовых вагонов. Это в свою очередь, ввиду наличия между вагонами сопряженных упруго – податливых связей между вагонами вызывает усложнение характера их колебательного процесса, создает опасный бортовой крен части состава, сопровождающийся обезгруживанием колес. Нагрузки на ходовые колеса при скоростях воздушного потока 12 м/с и 36 м/с соответственно представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Нагрузки на ходовые колеса при скорости воздушного потока 12 м/с и 36 м/с соответственно

Рельс	Нагрузка на колеса передней тележки, кН		Нагрузка на колеса задней тележки, кН	
При скорости воздушного потока 12 м/с				
Правый	7,26 (11,6)	8,03 (12,8)	7,65 (12,24)	8,33 (13,32)
Левый	7,41 (11,8)	7,68 (12,28)	7,9 (12,64)	8,28 (13,24)
При скорости воздушного потока 36 м/с				
Правый	10,57 (14,4)	10,58 (14,4)	8,08 (11)	12,3 (16,75)
Левый	7,27 (9,9)	7,97 (10,85)	8,13 (11)	8,5 (11,5)

* (процент распределения нагрузки на колесо)

Из полученных данных (табл. 1) следует, что минимальный уровень нагрузки на ходовое колесо при скорости воздушного потока 12 м/с не превышает предельного допустимого значения 10 % от весовой номинальной нагрузки, тогда как, при скорости воздушного потока 36 м/с минимальный уровень нагрузки на ходовое колесо **превышает** предельно допустимое значение 10 % от весовой номинальной нагрузки на передней тележке на левом колесе (рис. 2).

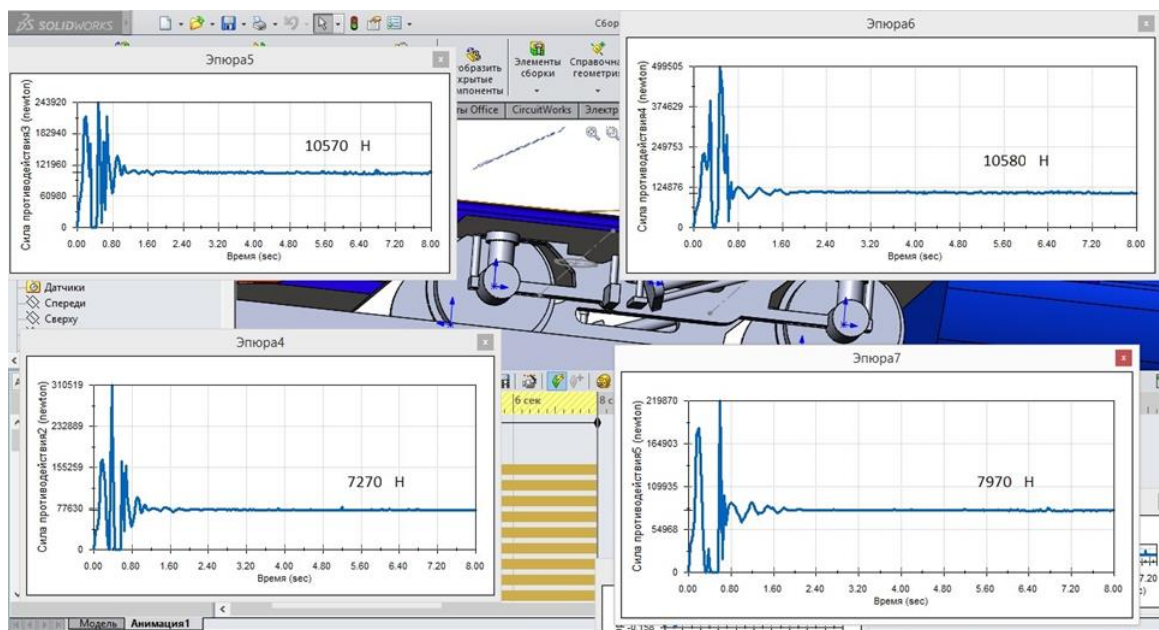


Рисунок 2 – Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» передней тележки при скорости бокового воздушного потока 36 м/с

Результаты численного моделирования динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с возмущенной воздушной средой при движении по пролетному сооружению ферменного моста показали, что ферменные сооружения мостов вызывают торможение части увлеченного поездом объема воздуха, вследствие его взаимодействия с частями конструкции фермы моста, что является негативным фактором, поскольку оказывает дополнительное сопротивление движению подвижного состава. Кроме того, ферменная конструкция мостового пролета для бокового ветра представляет собой периодически перфорированную структуру, в связи с чем, поток воздушных масс делится на отдельные повторяющиеся потоки, вызывая колебания скорости текучей среды, давления и завихренности, что отражается на зависимостях характерными, повторяющимися зубцами подобной формы. В отдельности каждое из этих возмущений (силовое воздействие на корпус проходящего подвижного состава) не оказывает существенного влияния, но их строго периодическое повторение при определенной скорости движения подвижного состава может вызвать существенное резонансное воздействие, что может оказать раскачивающее влияние на состав.

В третьей главе разработана математическая модель ходовой части высокоскоростного подвижного состава, учитывающая упругий контакт колеса и рельса, который моделируется с помощью элемента «твёрдотельный контакт», подразумевающий определение столкновений элементов с вычислением величины взаимного проникновения поверхностей на основе свойств упругости и определением вектора силы реакции. Сила реакции вычисляется по формуле:

$$F_p = k \cdot g^e + \text{step}(g, d_0, c_0, d_{\max}, c_{\max}) \frac{dg}{dt}, \quad (1)$$

где k – жёсткости материала на границе взаимодействия контактной пары; g – величина взаимного проникновения геометрии элементов контактной пары; e – показатель степени в предполагаемой экспоненциальной модели зависимости силы контакта от перемещения (в настоящей модели принят $e = 1,5$ для отражения нелинейной упругости реального материала, где при сжатии жёсткость увеличивается с ростом деформации); d_{\max} – максимальная деформация, при которой решающая программа Solidworks Motion применяет значение коэффициента демпфирования $c = c_{\max}$; dg/dt – скорость проникновения в точке контакта; $\text{step}(g, 0, 0, d_{\max}, c_{\max})$ – ступенчатая функция, определяющая коэффициент демпфирования в зависимости от величины проникновения g : $\text{step} = c_0 = 0$ при $g \leq (d_0 = 0)$ (нет проникновения, демпфирование отсутствует), $\text{step} = c_{\max}$ при $g \geq d_{\max}$ (максимальное

демпфирование); в промежутке $0 < g < d_{max}$ функция *step* плавно возрастает по S-образной кривой от 0 до c_{max} .

Сцепки вагонов обладают заданной жёсткостью в осевом направлении. Также учитывается влияние гравитации. Колебания кузова вагона в установившемся режиме моделируются силой, приложенной к центру тяжести кузова, и изменяющейся по гармоническому закону. Ветровая нагрузка смоделирована в виде сосредоточенной силы, эквивалентной воздействию ветра со скоростью 27 м/с, приложенной перпендикулярно продольной оси вагона в точке, соответствующей проекции на среднюю плоскость центра боковой грани кузова. Модуль вектора ветровой нагрузки вычислялся как:

$$F_{\text{ветр}} \approx 0,5\rho V_{\text{ветр}}^2 S_6, \quad (2)$$

где $\rho = 1,25$ кг/м³ – плотность воздуха, $V_{\text{ветр}}$ – скорость ветра, S_6 – площадь борта вагона.

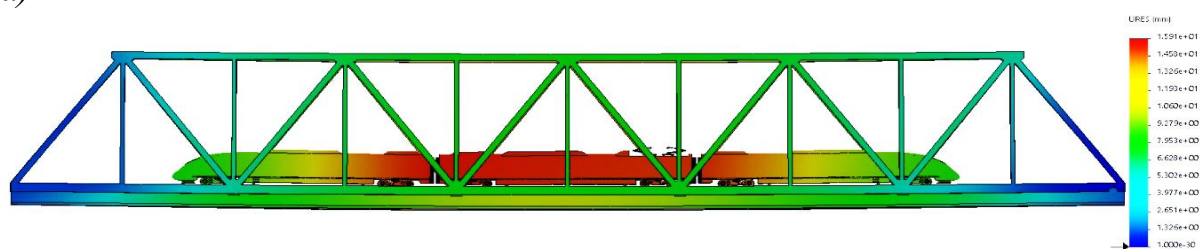
Настоящая модель рассматривает движение состава из 5 вагонов в установившемся режиме со скоростью 350 км/ч. Начальная дискрета по времени $\Delta t = 0,02$ с, точность вычислений 0,0001. Моделирование движения производится на основе методов Лагранжевой механики с помощью решающей программы Solidworks Motion, программа генерирует систему связанных дифференциальных и алгебраических уравнений, которая решается для каждого момента времени методом Гира. Выполненная апробация модели показала ее применимость в части исследования совместных колебаний системы, состоящей из поезда и мостовой конструкции, под действием возмущающих сил, возникающих в ходе движения поезда на скорости 350 км/ч по податливой опорной поверхности с учетом дополнительной ветровой нагрузки, а также резонансных явлений. Полученные данные демонстрируют высокую динамическую активность системы и подтверждают необходимость учёта контактных сил в последующих расчётах.

В четвертой главе для валидации компьютерной модели разработана методика и проведены натурные испытания динамического воздействия высокоскоростного подвижного состава с определением амплитудно-частотных характеристик вибрации колебаний системы поезд – путь – мост, действующих на кузова головного и хвостового вагонов поезда Velaro RUS («Сапсан»), при движении по мосту на участке Москва – Санкт-Петербург Октябрьской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» в прямом и обратном направлении. Результаты натурного эксперимента позволили провести валидацию построенной модели.

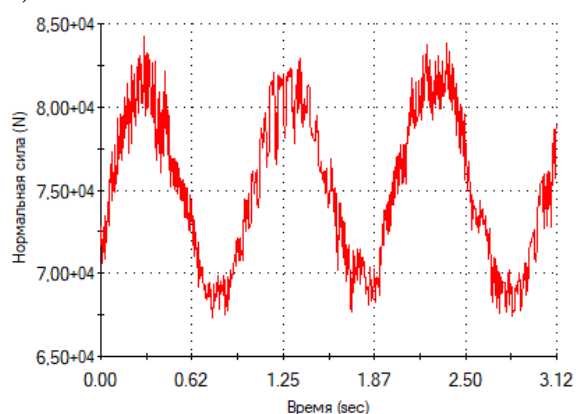
Для исследования влияния длины пролёта моста на динамическое поведение системы, включающей путь и подвижной состав, при высокоскоростном движении произведено моделирование динамики взаимодействия подвижной многокомпонентной нагрузки по пролетному строению, представленного шарнирно – сочлененным стержнем переменной жесткости. Рассматриваемые пролёты различной длины, позволили выявить критические сочетания параметров, приводящие к резонансным явлениям. Во всех исследуемых случаях наблюдалось возбуждение колебаний с собственной частотой пролёта при прохождении последней тележки через последнюю четверть длины моста. Максимальные ускорения фиксировались в момент завершения движения состава по пролёту, что свидетельствует о переходном резонансном эффекте.

Таким образом, во время прохождения поезда приложение контактной нагрузки находится на нерезонансных частотах и не представляет угрозы конструкции, однако после прохождения возможна инициация явления механического резонанса; это подтверждается опытом эксплуатации из практики и заслуживает дальнейшего изучения.

а)



б)



в)

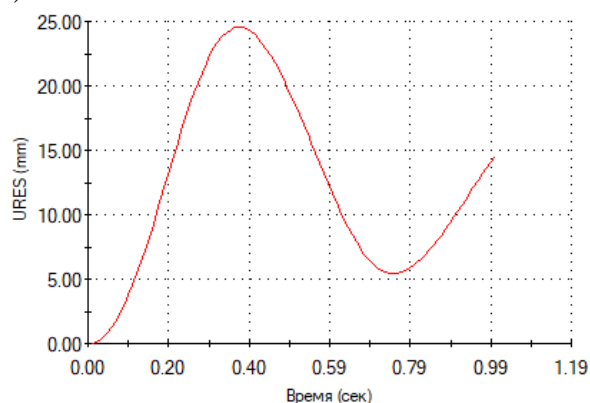


Рисунок 3 – Динамическое взаимодействие системы «поезд – пролетное строение ферменного типа»: а – эпюра результирующих перемещений системы «поезд – мост» (момент совместного колебательного процесса); б – смоделированная нагрузка на рельс со стороны колеса состава, которая использовалась в качестве нагрузки в модели; в) результирующее перемещение (URES, мм)

Далее было выполнено численное моделирование аэродинамического взаимодействия, сочлененного многофюзеляжного состава с приближенной инфраструктурой. В качестве одной из применяемых внешних нагрузок использовалась вертикальная составляющая силы контактного взаимодействия колеса и рельса Q_y . Для корректного применения в модуле Simulation исходная кривая временной характеристики приложенной силы обработана фильтром сглаживания, скользящего среднего в программе MathLab. В результате проведенных исследований была получена динамическая эпюра результирующих перемещений системы «поезд – пролетное строение ферменного типа», показанная в виде деформированного результата на рисунке 3.

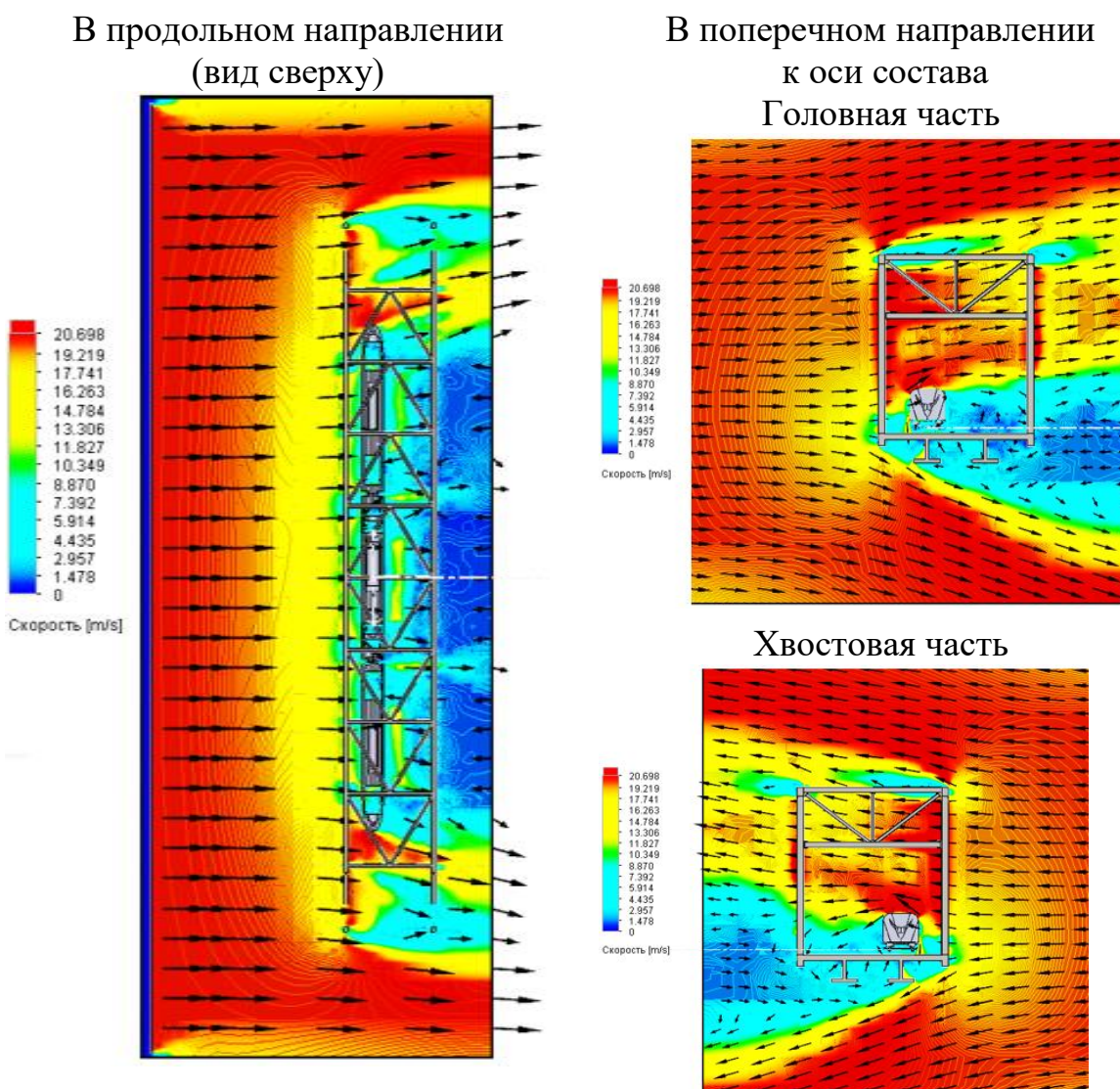


Рисунок 4 – Моделирование аэродинамического взаимодействия состава с металлоконструкцией фермы моста

С учетом движения состава отмечаются характерные процессы, похожие для движения поезда на эстакаде (гл. 2): в частности, обнаружена выраженная

устойчивая тенденция к смещению участков вихреобразования в направлении хвоста поезда. К особенностям структуры вязкой среды в пределах объема металлоконструкции фермы следует отнести высоко интенсивный процесс торможения ускоренных масс за счет взаимодействия с неподвижными элементами фермы моста. На эпюрах можно наблюдать явление отрыва потока с поверхностей корпуса состава, расположенных на значительной дистанции от хвостового обтекателя, что не характерно для случаев движения состава на открытом пространстве (рис. 4).

В результате исследования установлено, что шарнирно – сочлененная модель подвижного состава оказывает характерное влияние на формирование воздушной среды в коридоре движения поезда. В частности, имеющаяся угловая и линейная податливость упругих сочленений позволяет занимать корпусным элементам пространственное положение, которые дают возможность минимизировать потенциальную энергию от воздействия набегающего потока воздушных масс.

Полнофакторное моделирование по определению динамики движения высокоскоростного подвижного состава по мостовому сооружению показало, что деформации пролетного строения и грунта носят волновой характер. Расчет выполнен в нестационарной постановке. Рассмотрен временной диапазон от 0 до 4 секунд, что соответствует времени прохода поезда по мосту с установленной скоростью. За начало отсчета принято время наезда первой колесной пары на рельс моста. Выявлено явление интерференции колебаний грунта по прошествии 3,15 секунд после начала процесса.

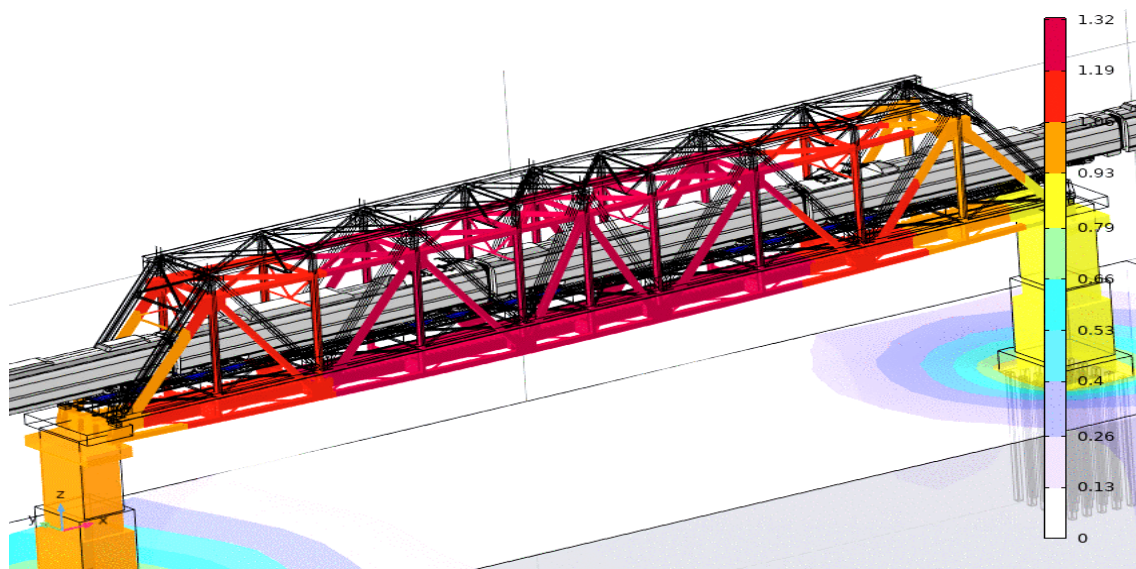


Рисунок 5 – Распределение напряжений в конструкции моста при воздействии нагрузок от колесных пар поезда (значение времени 2,3 секунды от момента въезда поезда на мост – соответствует максимальной деформации конструкции)

Анализ распределения напряжений в конструкции моста при воздействии нагрузок от колесных пар поезда показывает (рис. 5), что близкие значения критической скорости $V_{\text{крит } Z} \approx 255 \text{ км/ч}$ для возникновения периодических вертикальных колебаний системы, вызванных действием механического и аэродинамических факторов, говорят о возможном синергическом эффекте при некоторых конфигурациях системы и несомненно требует дальнейшего исследования.

Выявлено, что распространение напряжений также носит волновой характер. По этой причине представляет интерес анализ процесса распространения энергии колебаний, возбуждаемых движущимся поездом в объеме эстакады и толще грунта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе «Моделирование динамики взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с объектами транспортной инфраструктуры с учетом интенсивного воздействия бокового ветра» предложены новые научно-обоснованные технические и технологические решения по повышению безопасности и скорости движения за счет построения уточненной модели распределения веса высокоскоростного подвижного состава по осям колесных пар ходовых тележек под воздействием турбулентных воздушных потоков, образующихся при слиянии бокового ветра и инерционного наддува увлеченной воздушной среды от движения поезда в пространстве «подвижной состав – искусственное сооружение транспортной инфраструктуры», а именно:

1. Разработаны цифровые двойники твердотельных моделей высокоскоростного подвижного состава и приближенной периферии (эстакады, ферменные мостовые конструкции) позволяющие более полно определять физику процессов взаимодействия пары «колесо-рель» и других сопряженных элементов, с учетом демпфирующих и жёсткостных свойств элементов транспортной инфраструктуры, и ходовой части высокоскоростного подвижного состава.

2. Разработана методика и выполнены экспериментальные исследования аэродинамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава и мостового сооружения.

3. Разработана методика, позволяющая представить в виде системы взаимодействующих между собой высокоскоростного подвижного состава и мостового сооружения, учитывающая жесткость опор и ферм пролетного сооружения, а также рассматривать ходовую часть подвижного состава как

многотельную систему упруго-сочлененных элементов, обладающих диссипативными свойствами.

4. Выполнено численное моделирование движения высокоскоростного подвижного состава по мостам ферменного типа различной длины с помощью разработанной математической модели в квазистационарной постановке.

5. Показано, что вне зависимости от длины моста наблюдается возбуждение колебаний с собственной частотой пролёта при прохождении последней тележки через последнюю четверть длины моста. При этом максимальные ускорения фиксируются в момент завершения движения состава по пролёту, что свидетельствует о переходном резонансном эффекте. Полученные данные подчёркивают необходимость учета не только нагруженного, но и разгруженного состояния пролёта при проектировании.

6. Разработана математическая модель, позволяющая выполнять численные исследования напряженно-деформированного состояния ферменного моста под воздействием нагрузок от движущегося высокоскоростного поезда с помощью метода конечных элементов в нестационарной постановке.

7. Предложена методика учета динамического воздействия на конструкцию моста, грунт и опоры со стороны движущегося высокоскоростного поезда с помощью граничных условий, позволяющих моделировать движение поезда путем перемещения нагрузки вдоль рельсового пути с заданной скоростью.

8. Показано, что распределение деформаций моста при проходе по ней высокоскоростного поезда, а также характер возникающих при этом напряжений в ней, а также в толще окружающего ее грунта носят волновой характер. При этом величина деформации грунта значительно (более чем в 2 раза) уменьшается с ростом глубины. Значение же ускорения значительно затухает по мере удаления от опоры. В целом же полученные значения деформаций и напряжений незначительны для данного типа конструкции и не представляют опасности.

9. На основе результатов исследования распределения удельной энергии системы выявлено, что интенсивность энергетических процессов, обусловленных наличием волновой и динамической нагрузок от движущегося поезда имеет тенденцию к резкому снижению по мере распространения вглубь конструкции, что связано с процессами рассеяния энергии в толще опоры и эстакады.

10. Выполненный модальный анализ колебаний конструкции позволил определить резонансные частоты, которым соответствуют наибольшие значения масс, вовлеченных в колебательный процесс, т.е. обладающие высокой энергией

деформации, что свидетельствует о высокой надежности выбранного варианта конструкции.

11. Уточнен механизм взаимодействия пары «колесо – рельс» высокоскоростного подвижного состава в условиях интенсивного аэродинамического сопротивления.

12. Разработаны рекомендации по повышению безопасности движения на основе анализа взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с искусственными сооружениями транспортной инфраструктуры в условиях движения при интенсивном воздействии бокового ветра:

- выявлено, что при увеличении скорости движения подвижного состава имеет место тенденция к образованию срывных вихрей воздушной среды на поверхностях головного и хвостового вагонов скоростного поезда. При скоростях выше 300 км/ч образуется дополнительный опрокидывающий момент, вызывающий снижение качества контакта колеса с поверхностью рельса. Для снижения негативного воздействия возмущенной воздушной среды на транспортное средство рекомендуется изменение формы обтекателей головного и хвостового вагонов, путем придания им формы «оживало», обеспечивающей снижение интенсивности вихреобразования на высоких скоростях движения;

- для исключения резонансных явлений, возникающих при прохождении высокоскоростным поездом мостовых конструкций без ограничения скорости, рекомендуется избегать применения пролетных строений длиной менее базы вагона;

- сравнение результатов расчета, выполненных с помощью разработанной методики учета бокового обдува и движения поезда методом обратимости, показали, что последний дает заниженные значения воздушного давления, а распределение давления и силовая нагрузка существенно отличаются и слабо согласуются с результатами экспериментальных данных. Это не позволяет рекомендовать метод обратимости для анализа процессов аэроупругого взаимодействия высокоскоростного подвижного состава и искусственных сооружений;

- представление движущегося высокоскоростного поезда в виде многофюзеляжной шарнирно-сочлененной системы с упругими связями позволяет получить более точное описание картины распределения нагрузок на колесные пары при движении с высокими скоростями в условиях бокового ветра за счет учета взаимного перемещения корпусных элементов подвижного состава.

Рекомендации и перспективы дальнейшего исследования по теме:

Предполагается дальнейшее исследование особенностей перераспределения веса подвижного состава по осям колесных пар ходовых тележек под воздействием турбулентных воздушных потоков, образующихся при совместном действии бокового ветра и инерционного наддува увлеченной воздушной среды от движения поезда в пространстве «подвижной состав – искусственное сооружение транспортной инфраструктуры», а также повышение энергоэффективности и безопасности движения в условиях интенсивного аэродинамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами транспортной инфраструктуры.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в журналах из **Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК Российской Федерации и приравненных к ним:**

1. Расчет назначенного срока службы цельнокатаных колес железнодорожного подвижного состава по критерию надежности / А. А. Воробьев, И. В. Федоров, **Э. Ю. Чистяков** [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 121-131.
2. Повышение эффективности эксплуатации колесных пар подвижного состава / О. С. Валинский, А. А. Воробьев, **Э. Ю. Чистяков** [и др.] // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2022. – № 4-5(101-102). – С. 30-35.
3. Нуриев, А. Г. Развитие использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар / А. Г. Нуриев, **Э. Ю. Чистяков**, Н. А. Битюцкий // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 1. – С. 7-18.
4. Дистанционная калибровка шаблонов в районах Крайнего Севера / **Э. Ю. Чистяков**, А. Ю. Павлов, Я. А. Гренадер, А. Г. Нуриев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2023. – Т. 20, № 1. – С. 133-141.
5. Дистанционная калибровка динамических вагонных весов / **Э. Ю. Чистяков**, А. Ю. Павлов, А. Г. Нуриев [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. – 2024. – № 4. – С. 103-111.
6. Воробьев, А. А. Оценка устойчивости высокоскоростного подвижного состава при движении по эстакаде с учетом повышенной пиковой

ветровой нагрузки / А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, **Э. Ю. Чистяков** // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2024. – № 6(115). – С. 27-32.

7. Моделирование аэродинамической нагрузки на высокоскоростной состав / **Э. Ю. Чистяков**, А. А. Воробьев, А. С. Ватаев, [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2025. – № 2. – С. 44-46.

8. Оценка динамического воздействия высокоскоростного подвижного состава на эстакадные и мостовые сооружения на грунтах с пониженной несущей способностью / А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, А. С. Ватаев, **Э. Ю. Чистяков** // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2025. – № 3(118). – С. 37-42.

Патенты на изобретения и полезные модели:

9. Патент на полезную модель № 201861 U1 Российская Федерация, МПК G01M 17/10. Устройство для имитации процесса нагружения колеса на рельс: № 2020127831: заявл. 19.08.2020: опубл. 15.01.2021 / А. А. Воробьев, **Э. Ю. Чистяков**, Н. Ю. Шадрина [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668716 Российская Федерация. Программа расчета назначенного срока службы цельнокатаных колес подвижного состава: № 2021667774: заявл. 08.11.2021: опубл. 19.11.2021 / А. А. Воробьев, И. В. Федоров, **Э. Ю. Чистяков**, М. Н. Козлов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Прочие публикации:

11. Воробьев, А. А. Разработка мероприятий по повышению ресурса железнодорожных колес с выщербинами / А. А. Воробьев, О. А. Конограй, **Э. Ю. Чистяков** // Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции, Самара, 26–27 января 2023 года. – Самара: Самарский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 168-171.

12. Оценка динамики движения высокоскоростного подвижного состава с учетом однократной пиковой положительной ветровой нагрузки / А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, А. Н. Цыбульский, **Э. Ю. Чистяков** // Вестник

Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2024. – Т. 68, № 4. – С. 46-53.

13. **Чистяков, Э. Ю.** Методика моделирования аэродинамических нагрузок на высокоскоростной подвижной состав при движении по эстакадам в условиях штормового воздействия / Э. Ю. Чистяков // Актуальные вопросы современной науки: теория, методология, практика, инноватика: сборник научных статей по материалам XVI Международной научно-практической конференции, Уфа, 29 апреля 2025 года. – Уфа: Научно-издательский центр «Вестник науки», 2025. – С. 55-60.

14. Воробьев, А. А. Оценка устойчивости высокоскоростного подвижного состава при движении по эстакаде с учетом повышенной пиковой ветровой нагрузки / А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, **Э. Ю. Чистяков** // Транспорт БРИКС. – 2025. – Т. 4, № 1.

15. Проблематика внедрения искусственного интеллекта как нейропомощника на примере ОАО «РЖД» / А. А. Гречиха, С. М. Плешаков, **Э. Ю. Чистяков**, А. Ю. Павлов // Экономика железных дорог. – 2025. – № 4. – С. 91-101.

Монографии:

16. Управление аэроупругим взаимодействием подвижного состава с элементами транспортной инфраструктуры / А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, **Э. Ю. Чистяков** [и др.]. – Казань: ООО «Бук», 2025. – 138 с.

Чистяков Эдуард Юрьевич
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С
ОБЪЕКТАМИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С УЧЕТОМ
ИНТЕНСИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ БОКОВОГО ВЕТРА

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 01.12.2025 Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,39. Тираж 100 экз. Заказ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

Адрес университета: 344038, Ростовская область, г. о. город Ростов-на-Дону,
г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2,
www.rgups.ru

