

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I»

(ФГБОУ ВО ПГУПС)

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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор
Воробьев А.А.

Санкт-Петербург
2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	14
1.1 Обзор отечественных и зарубежных исследований в области исследования аэродинамического взаимодействия подвижного состава и искусственных сооружений	14
1.2 Обзор отечественных и зарубежных исследований колебательных процессов мостовых сооружений при взаимодействии с подвижным составом	20
1.3 Обзор отечественных и зарубежных исследований колебательных процессов в области взаимодействия колеса и рельса высокоскоростного подвижного состава	22
1.4 Обоснование выбора участка для исследования	24
Выводы по главе 1	27
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА	31
2.1. Математическая модель аэродинамического сопротивления движения высокоскоростного подвижного состава	31
2.2. Объекты моделирования и исходные данные	31
2.3 Исследование силовых факторов воздействия на корпусные элементы подвижного состава со стороны воздушной среды	36
2.4. Аэродинамическое воздействие на объекты, расположенные перпендикулярно оси пути	43
2.5. Расчётные схемы и принятые допущения	47
2.6. Методика определения характеристик ветровой нагрузки	47
2.7 Алгоритм расчета аэродинамического давления на объекты транспортной инфраструктуры	49
2.8. Верификация аэродинамической модели высокоскоростного подвижного состава	50
2.9 Алгоритм численного моделирования динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с возмущенной воздушной средой и объектов транспортной инфраструктуры	54
2.10. Результаты численного моделирования динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с возмущенной воздушной средой при движении на эстакаде	57
2.11. Результаты численного моделирования динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с возмущенной воздушной средой при движении по пролетному сооружению ферменного моста	68
Выводы по главе 2	84
ГЛАВА 3 ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С УЧЕТОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	86
3.1 Моделирование угловой податливости корпусов экипажной части высокоскоростного подвижного состава с учетом жёсткостных характеристик его ходовой части	86

3.2 Алгоритм создания многотельной динамической модели подвижного состава.....	88
3.3. Моделирование компонентов объекта исследования	90
3.3.1 Кузов и тележка.....	90
3.3.2 Первичная подвеска	91
3.3.3 Вторичная подвеска	91
3.3.4 Силы и связи	91
3.4. Моделирование движения высокоскоростного подвижного состава.....	93
3.5. Результаты моделирования движения высокоскоростного подвижного состава	97
Выводы по главе 3.....	100
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И ПРИБЛИЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПЕРИФЕРИИ.....	101
4.1. Методика проведения натурных испытаний динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава при прохождений мостовых сооружений	101
4.2. Моделирование динамики взаимодействия подвижной многокомпонентной нагрузки по пролетному строению, представленного шарнирно – сочлененным стержнем переменной жесткости.....	116
4.3. Валидация модели.....	121
4.4. Численное моделирование аэродинамического взаимодействия сочлененного многофюзеляжного состава с приближенной инфраструктурой.....	126
4.5. Результаты численного моделирования аэродинамического взаимодействия сочлененного многофюзеляжного состава с приближенной инфраструктурой	130
4.6 Сравнительный анализ параметров воздушной среды при движении поезда в объеме металлоконструкции пролетного строения ферменного моста с учетом и без учета колебательных процессов многофюзеляжного состава.....	141
4.7. Полнофакторный компьютерный эксперимент определения динамики движения высокоскоростного подвижного состава по мостовому сооружению.....	150
4.7.1. Постановка задачи исследования	151
4.7.2. Расчет напряженно- деформированного состояния эстакады при действии динамических нагрузок от движущегося поезда	152
4.7.3. Расчет собственных частот колебательных процессов	158
Выводы по главе 4.....	163
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	165
СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	169
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	183

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Развитие сети высокоскоростных железнодорожных и скоростных магистралей неразрывно связано с вопросами обеспечения безопасности движения поездов в зонах с повышенными ветровыми нагрузками. Наличие значительных открытых пространств при пересечении широких рек, движении вдоль прибрежной полосы по мостовым и эстакадным конструкциям ферменного и балочного типа в условиях сильного бокового ветра может привести к перераспределению веса подвижного состава по осям колесных пар ходовых тележек. Аналогичные эксплуатационные проблемы возникают при прохождении высокоскоростного поезда вблизи искусственных сооружений, а также порталных частей тоннелей [1-3]. 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, рессорного подвешивания, колеса и рельса. При этом на характер и форму колебаний узлов и элементов высокоскоростного подвижного состава оказывают влияние упругие связи между вагонами движущегося поезда.

Решением задач, связанных с аэродинамическими процессами, в том числе аэроупругим взаимодействием подвижного состава с окружающими его объектами и конструкциями занимались отечественные и зарубежные ученые: Е.Л. Алферова, О.В. Батурин, А.С. Ватаев, Я.С. Ватулин, А.Д. Гиргидов, Д. Д. у. Каримов, Ю.М. Лазаренко, Е.М. Сюзюмова, А.Я. Сагомоян, Е.Я. Полякова, Н. А. Чурков, С. Baker, С. Harvey, S. Lee, S.C. Jordon, A. Sanz-Andres, A. Laveron, A. Cuerva и др. В достаточно степени разработана теория колебаний, возникающих при взаимодействии пути и ходовой части подвижного состава, изложенная в работах М.Ф. Вериги, А.Н. Горского,

А.Я. Когана, А.М. Орловой и др. ученых. С теоретической и экспериментальной стороны в работах С.А. Бернштейна, Н.М. Беляева, В.С. Сафронова, В.П. Тарасенко, И.И. Иванченко и др. изучены колебания мостовых конструкций различных типов, в том числе процессы динамического взаимодействия мостовой конструкции и движущегося высокоскоростного поезда. Однако еще недостаточно изучены вопросы перераспределения веса подвижного состава по осям колесных пар ходовых тележек в условиях сложных колебательных процессов, обусловленных сочетанием аэродинамических сил, динамических нагрузок от колебаний движущегося высокоскоростного подвижного состава, представляющего собой систему упруго сочлененных элементов, а также колебательных процессов мостовой конструкции. Разработанные методики исследования динамического взаимодействия мостовых конструкций и высокоскоростного подвижного состава должны быть адаптированы с учетом сложного характера 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». Таким образом, задача комплексного исследования вопросов аэродинамического взаимодействия движущегося высокоскоростного подвижного состава с объектами железнодорожной инфраструктуры и искусственных сооружений при интенсивном воздействии бокового ветра и разработки рекомендаций по повышению энергоэффективности и безопасности процесса перевозок является актуальной.

Степень разработанности. 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 (ВНИКТИ, ВНИИЖТ, ДВГУПС,

ИрГУПС, РУТ (МИИТ), ОмГУПС, ПГУПС, ПривГУПС, РГУПС, СГУПС, УрГУПС), а также мировой практики внедряемой как для грузового, так и для скоростного движения (Испания, Франция, Китай, США, Япония и др.).

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 поставленной 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 жёстких 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 раз-

личных 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.

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.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработана уточненная динамическая модель аэродинамического

взаимодействия в системе «подвижной состав – искусственное сооружение транспортной инфраструктуры», с учетом энерго – массообмена на диффузно – 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.

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 колес-

ных 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 профессионального 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 «Сапсан» (Velaro Rus) 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» и на международных симпозиумах и конференциях: XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Томск, 2014 г.), LXXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. СПб, 2016 г.), 12th International Conference "Organization and Traffic Safety Management in Large Cities" (г. СПб, 2016 г.), International Conference On Geotechnics Fundamentals And Applications In Construction: New Materials, Structures, Technologies And Calculations (г. СПб, 2019 г.), LXXXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. СПб, 2022 г.), International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (г. СПб, 2023 г.), Второй Международной научно-технической конференции: Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы (г. СПб, 2023 г.), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: Математическое и экспериментальное

моделирование физических процессов (г. Биробиджан, 2023 г.), V Всероссийской научно-практической конференции (г. Самара, 2023 г.), Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки: теория, методология, практика, инноватика (г. Уфа, 2025 г.), XII Международный симпозиум «Eltrans – 2025» (г. СПб, 2025 г.).

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.

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 одно авторское свидетельство на полезную модель и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационное исследование проведено в соответствии с паспортом специальности ВАК Министерства образования и науки 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Обзор отечественных и зарубежных исследований в области исследования аэродинамического взаимодействия подвижного состава и искусственных сооружений

Общеизвестно, что при движении по открытому участку вдоль береговой линии высокоскоростной подвижной состав подвергается воздействию сложного сочетания воздушных потоков, образующихся вымещением и инерционным увлечением воздушных масс движущимся корпусом подвижного состава, а также потоков воздушных масс бокового направления со стороны открытого пространства водной поверхности. В определенных условиях подобная нагрузка может оказать значительное влияние на безопасность движения транспортного средства [1].

Опрокидывающий момент [4 - 6], значительно снижает давление на колесные пары, а, следовательно, эффективность процесса торможения. Критерием предельного снижения давления на колесные пары является понижение в пределах 10 % распределенного веса подвижного состава [7, 8]. Задача обеспечения постоянства коэффициента сцепления усложняется в условиях движения по мостовой конструкции балочного типа, поскольку последняя является упругим основанием и также совершает колебательные движения. Движение же по ферменному мосту сопровождается более сложными колебательными процессами, в основе которых лежит не только действие возмущающих сил от движущегося поезда, но и аэроупругое взаимодействие. Сложность обеспечения устойчивости при движении в указанных условиях привели к необходимости исследований в данной области. Так, в технических требованиях ЕС по технико-эксплуатационной совместимости (TSI) регламентируется устойчивость подвижного состава к воздействию бокового ветра и снижению риска схода с рельсов при определенных климатических условиях на специфических участках пути, в частности на мостах и насыпях.

В процессе движения высокоскоростного состава в непосредственной близости от поверхности кузова в результате вытеснения и уплотнения воздушной среды формируются зоны повышенного и пониженного давления и плотности. Размеры и форма уплотненной и разряженной зон определяются профильным сопротивлением корпусных элементов подвижных единиц поезда, длиной состава, а также величиной скорости движения [1, 2, 5]. Одна из наиболее объемных зон повышенного давления формируется в районе головного обтекателя состава (см. рис. 1.1).

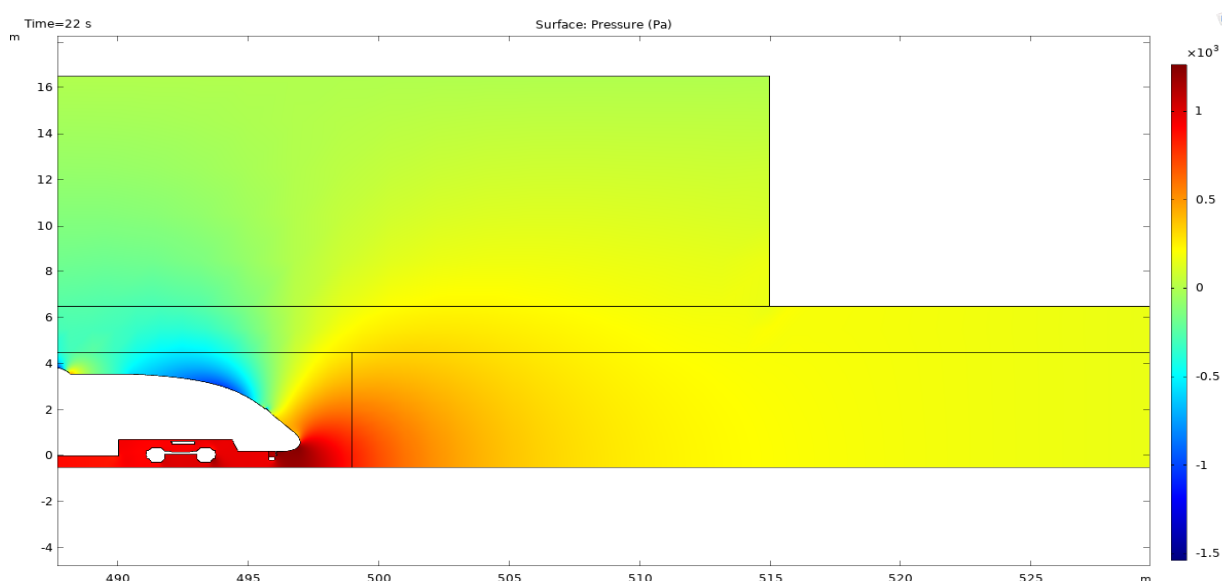
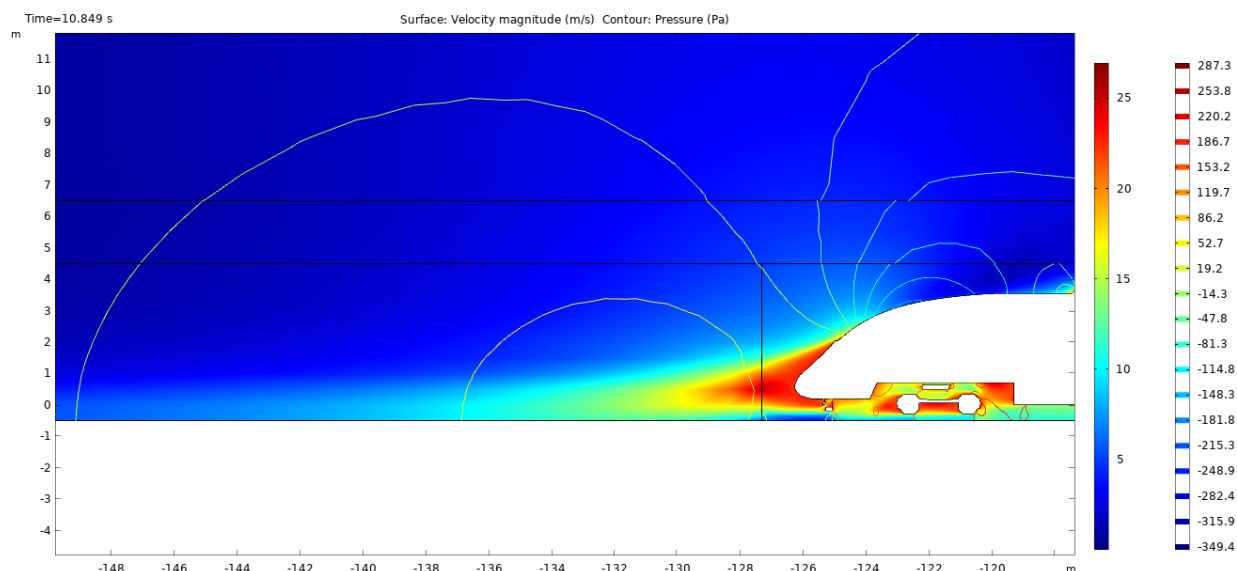


Рисунок 1.1 – Распределение давления вблизи движущегося высокоскоростного поезда вблизи головы состава на отдалении от искусственного сооружения (тоннель)

За хвостовым обтекателем формируется область пониженного давления, в результате чего образуется область увлекаемых поездом воздушных масс, скорость которых снижается по мере удаления от поезда. Пример распределения потоков воздуха и изобары давления показаны на рисунке 1.2.

Сформированный таким образом воздушный поток является турбулентным и имеет два силовых параметра (статическое и динамическое давление).



**Рисунок 1.2 – Эпюра распределения воздушных потоков
в зоне хвостового обтекателя**

Таким образом, в процессе движения подвижного состава непосредственно вблизи конструкции фермы в результате ускоренного сжатия воздушной среды вследствие вязкости воздуха возникают динамически замкнутые объемы газа, оказывающие механическое воздействие как на близко расположенные объекты, так и на сам состав, в которых могут существовать воздушные потоки с высоким градиентом положительных и отрицательных давлений, что в определенных условиях может представлять опасность как для подвижного состава, так и для приближенных строительных конструкций, поскольку в этих условиях возможно появление резонансов [1]. В задачах исследования контактного взаимодействия рельса и колеса при движении высокоскоростного подвижного состава по мостовым конструкциям в условиях интенсивного воздействия бокового ветра следует выделить три взаимосвязанных направления, а именно: исследование аэродинамического взаимодействия мостовых конструкций и подвижного состава при воздействии бокового ветра, исследование механических колебательных процессов, возникающих при движении подвижного состава по мостовым конструкциям с учетом податливости конструкции моста и подвески и исследование системы контакта колеса и рельса при наличии динамических нагрузок, обусловленных аэроупругим взаимодействием и механическими процессами в системе «поезд – мост».

Качественная картина поведения потоков воздушных масс несколько отличается от результатов, получаемых в аэродинамических трубах (масштабная модель 1:15 TGV Duplex в рабочей камере аэродинамической трубы (рис. 1.3.) [9- 10].

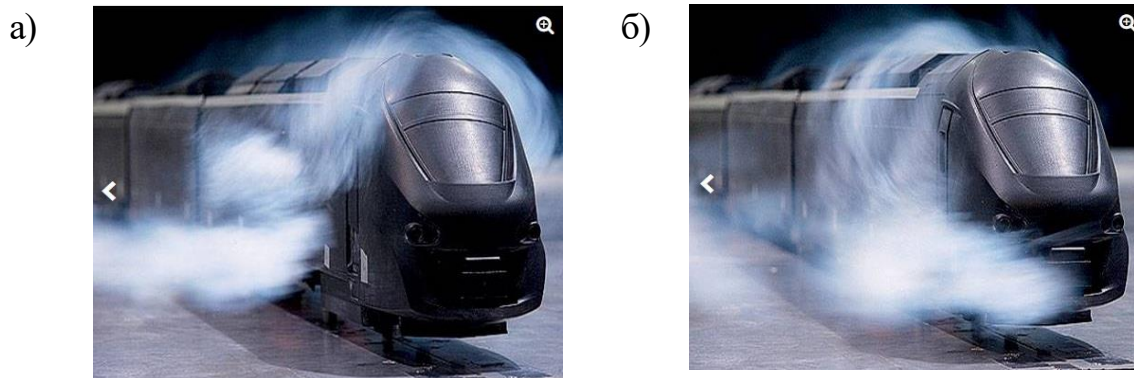


Рисунок 1.3 Испытания масштабной модели поезда TGV Duplex в рабочей камере аэродинамической трубы при боковом обдуве в головной (а) и хвостовой (б) частях [f_r]

Эти исследования хоть и позволили уточнить структуру воздушных потоков при боковом обдуве, однако основной проблемой таких исследований является принципиально иное распределение воздушных потоков, поскольку в аэродинамической трубе невозможно получить исследование потоков, движущихся со скоростью поезда. Кроме того, здесь невозможно оценить взаимодействие набегающего ветрового потока и увлекаемых поездом воздушных масс. По этой причине экспериментальное исследование воздушных потоков на моделях становится технически неосуществимым. Не менее важным фактором, ставящим полученные результаты под сомнение, является полное отсутствие инфраструктуры, в частности опор контактной сети. Как показывают исследования, проведенные в нашей стране [5, 6] и за рубежом [7], данные объекты принципиально меняют характер воздушной среды. Кроме того, при исследовании аэродинамических процессов, протекающих при движении поезда по мосту, необходимо учитывать потоки, омывающие мостовую конструкцию [11-13]. На рисунке 1.4 видны срывные потоки пониженного давления, оказывающие силовое воздействие на нижнюю часть боковой поверхности подвижного состава. Наибольшая интенсивность вихрей наблюдается вблизи головной и хвостовой частей подвижного состава.

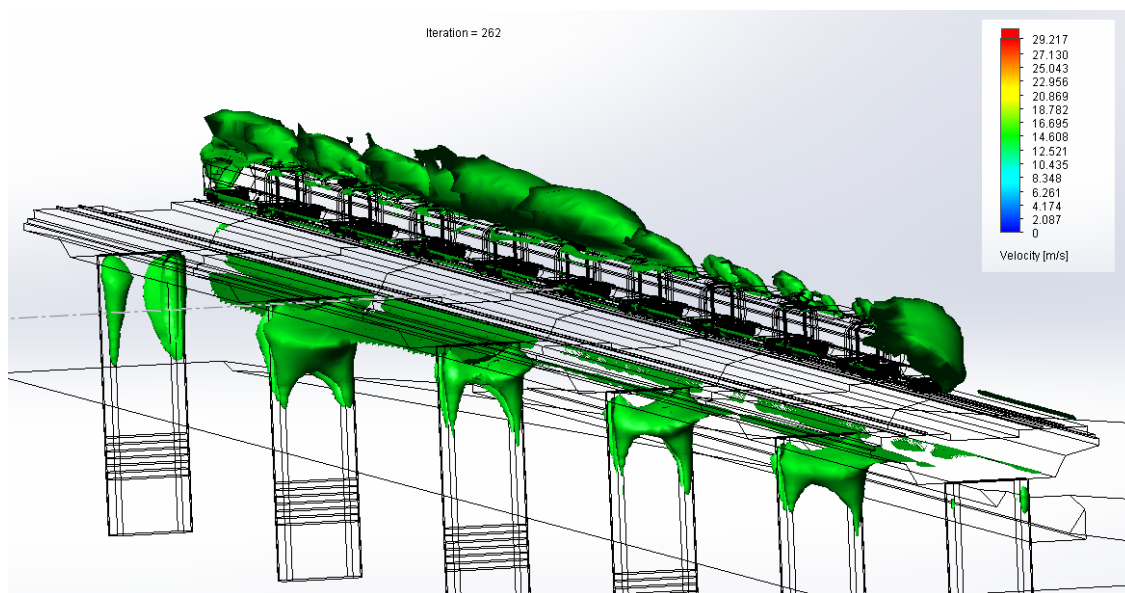


Рисунок 1.4 Механизм образования срывных вихрей при движении высокоскоростного поезда по эстакаде в условиях бокового ветра

К настоящему времени в практике исследований процессов аэродинамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава и объектов железнодорожной инфраструктуры (строений, путепроводов, ферм мостовых пролетов и пр.) сложилось представление о том, что рассматриваемое взаимодействие может быть в целом сведено к процессам на конфузор – диффузорном участке трубопроводов. Так, например, конфузор образует обтекатель движущегося поезда и пролетное строение ферменного моста, поскольку здесь вследствие взаимодействия перемещаемых поездом воздушных масс с элементами фермы, а также явлений волновой интерференции образуются области воздуха с высокой турбулентностью и низкой скоростью. Здесь происходит нарастание динамической составляющей давления и увеличение скорости потока. При этом возникает явление срыва потока, что сопровождается знакопеременной нагрузкой, направленной перпендикулярно потоку, а в случае совпадения частоты данной возмущающей нагрузки с одной из собственных частот элемента стержневой конструкции приводит к снижению ресурса объекта [3]. Большая протяженность пролетных строений, их малые значения логарифмических декрементов колебаний, а также низкие значения резонансных частот становятся факторами, требующими повышенного внимания при эксплуатации в условиях высокоскоростного движения.

При наличии бокового ветра картина аэродинамических процессов в системе мост – движущийся поезд значительно усложняется [12-13]. Здесь высокоскоростной подвижной состав, движущийся в габаритах ферменного пролетного строения, представляющий собой систему обтекаемых тел и ферма моста, которая является плохообтекаемым телом, вызывают при обтекании наиболее интенсивный изгиб потока воздушной среды и вихреобразование за телом, в зоне которого оказывается движущийся состав. В результате чего корпус поезда находится в зоне турбулентного потока переменной интенсивности, вызванной периодически перекрывающейся структурой элементов ферм. Такое явление получило название бафтинг [14]. В зависимости от упругих и демпфирующих свойств конструкции пролетного строения, вихревое возбуждение ветровой нагрузки способно вызывать ветровой резонанс конструкции, и явления галопирования и потери устойчивости поезда, которые представляют собой опасность для надежности и долговечности сооружения и безопасности движения поездов.

Таким образом, совместную работу металлоконструкции моста и движущегося в его объеме поезда под воздействием ветровой нагрузки следует рассматривать с учетом действия пульсаций ветра и динамических свойств поезда и моста с учетом упругих и демпфирующих свойств подвески и мостовой конструкции. Сложность экспериментального исследования данных явлений привела к тому, что наиболее перспективным методом их исследования является численное CFD – моделирование в трехмерной нестационарной постановке с учетом изменения взаимного расположения вагонов подвижного состава под действием ветровой нагрузки. Данная задача требует применения метода конечных элементов. Решения задачи в указанной постановке до сих пор не получено, поскольку отсутствует, в частности, модель исследования механических процессов в системе мост-поезд с учетом податливости мостовой конструкции и упруго-деформирующих свойств механической части движущегося поезда. Выполним обзор современного состояния исследований в области

колебательных процессов мостовых сооружений при взаимодействии с подвижным составом.

1.2 Обзор отечественных и зарубежных исследований колебательных процессов мостовых сооружений при взаимодействии с подвижным составом

История научных исследований в области колебаний мостовых конструкций под воздействием движущихся нагрузок берёт своё начало в середине XX века. Первые работы были сосредоточены на низкочастотных колебаниях мостов и использовали аналитические методы на основе упрощённых моделей, без учёта динамики пути и сложных взаимодействий между подсистемами. К 1960 годам накопленный опыт эксплуатации железных дорог, теоретических исследований и анализа данных экспериментов [15] дал возможность на базе научного обобщения имеющихся материалов предложить практические методы учета динамического воздействия железнодорожных нагрузок для проектирования новых и расчётного определения грузоподъемности эксплуатируемых мостов [16]. Эти предложения нашли свое отражение в действующих нормах [17]. В фундаментальных работах Бернштейна С.А., Рабиновича И.М., Смирнова А.Ф. были заложены теоретические основы анализа динамического поведения мостов под действием подвижных нагрузок. Позже большой вклад в развитие методологии прикладных исследований в данной области внесли работы Болотина В.В., Сафронова В.С., Тарасенко В.П. и др. Данные исследования были посвящены разработке аналитических методов решения задач о вынужденных колебаниях балок, учитывающих как инерционные характеристики подвижного состава, так и динамические свойства самой конструкции. Эти работы стали отправной точкой для последующего развития теории взаимодействия транспортных средств и мостовых сооружений.

В 1980-90-х годах развитие высокоскоростного железнодорожного транспорта потребовало разработке более совершенных математических моделей, учитывающих не только массу подвижного состава, но и характеристики системы подвески, а также многослойную структуру железнодорожного пути.

В этот период благодаря развитию вычислительной техники и постепенному становлению систем компьютерного инженерного анализа произошёл качественный переход от упрощённых аналитических моделей к численным методам анализа, в частности, к широкому применению метода конечных элементов для моделирования мостовых конструкций. В частности, в 2000-х посвящённые данному аспекту работы внесли существенный вклад в понимание сложных динамических процессов, возникающих при высокоскоростном движении. Значительный вклад в развитие этого направления внесли работы Кадисова Г.М., посвящённые динамике и устойчивости транспортных пролётных сооружений, а также Иванченко И.И., посвящённые комплексному анализу динамического взаимодействия мостов и высокоскоростных железнодорожных составов, включая так же воздействие сейсмических и аэродинамических нагрузок.

Современный этап исследований характеризуется развитием трёхмерных моделей взаимодействия, учитывающих полный комплекс динамических процессов в системе "подвижной состав - путь - мост" (англ. Train-track-bridge interaction, TTBI). Работы Чжай В., Ян Я.Б. и др. демонстрируют переход к комплексному численному моделированию нелинейных характеристик взаимодействия и пространственной работы конструкций с учётом статистических характеристик параметров системы. Особое внимание в последние годы уделяется вопросам учёта неровностей и податливости пути, воздействия внешних факторов (сейсмических, аэро- и гидродинамических), что нашло отражение в исследованиях ряда современных авторов.

На современном этапе развитие вычислительных технологий позволяет перейти к созданию гибридных междисциплинарных моделей, сочетающих несколько разнородных физических моделей в контексте моделирования одного процесса. Кроме того, повышение технологичности, точности и доступности измерительного оборудования позволяет современным исследователями использовать методы экспериментальной верификации математических моделей, включая как стендовые эксперименты, так и полевые измерения на

реальных мостовых сооружений, что значительно повышает достоверность получаемых результатов.

Исследования в области взаимодействия подвижного состава и пролётного строения продолжают развиваться, включая всё более сложные модели и методы анализа, однако вопросы, отражающие степень и характер влияния процессов аэродинамического взаимодействия подвижного состава и мостовой фермы, на форму и характер колебаний мостовой конструкции остаются мало изученными.

Наиболее полно проработаны вопросы колебания надрессорного строения подвижного состава, в том числе обусловленные упругими свойствами железнодорожного пути. Вместе с тем, в данных работах недостаточно внимания уделяется влиянию упругих свойств мостовых ферм, а также пути, расположенному на мостах различной конструкции, не учтены неравномерность нагрузки колесных пар и сложный характер движения поезда под действием аэродинамических сил, обусловленных аэроупругим взаимодействием подвижного состава и искусственных сооружений. Эти процессы существенно влияют на особенности взаимодействия рельса и колеса высокоскоростного подвижного состава в условиях резко изменяющихся нагрузок, обусловленных аэродинамическими процессами, протекающими в исследуемой системе.

1.3 Обзор отечественных и зарубежных исследований колебательных процессов в области взаимодействия колеса и рельса высокоскоростного подвижного состава

Особенности взаимодействия рельса и колеса в условиях высокоскоростного движения в течение многих лет находятся в фокусе рассмотрения ведущих отечественных и зарубежных ученых. Они носят многофакторный характер и представляют большую актуальность. Наибольшее число исследований было связано с анализом работы контактной пары «колесо-рельс» в кривых, поскольку в этой области имеют место наиболее напряженные условия взаимодействия. В условиях бокового ветра и значительных усилий, действующих

на боковые поверхности кузовов подвижного состава неизбежно смещение головной и хвостовой частей поезда, в значительной мере возникает возникновение дополнительных усилий в контакте «гребень колеса – боковая поверхность головки рельса», аналогичные тем, что формируются при вписывании подвижного состава в криволинейные участки пути [18-24]. В условиях высокоскоростного движения нагрузки в указанных контактных парах колес первой и последней тележек могут быть увеличенными и сопровождаться повышением потерь, связанным с трением, что может привести к увеличению сопротивления движению поезда, износа гребней колес и рельсов, и затрат на тягу. Сложная кинематика движения колесной пары в условиях бокового ветра и движения по мостовой конструкции в сочетании с высокими контактными нагрузками, скоростями скольжения и температурами, закладывают основу для зарождения и развития различных дефектов колесных пар и рельсов (к примеру, выкрашивание металла из гребня или боковой поверхности головки рельса, микротрещины и т.п.) и в определенных условиях может привести к катастрофе. Практика совместной эксплуатации грузовых и пассажирских поездов в сочетании с ежегодным ростом средней грузонапряженности и осевых нагрузок приводит к увеличению дефектов рельсового пути, что неизбежно сказывается на функционировании фрикционной системы «колесо-рельс». Ввиду того, что существующие методики анализа процессов в контактной паре колесо-рельс в основном разработаны применительно к грузовым вагонам, актуальность представляют вопросы их адаптации и установлении границ их применимости в условиях высокоскоростного движения по мостовым конструкциям в условиях сложных колебательных процессов, обусловленных сочетанием аэродинамических сил, динамических нагрузок от колебаний движущегося высокоскоростного подвижного состава, представляющего собой систему упруго соединенных элементов, а также колебательных процессов мостовой конструкции. К тому же разработанные методики исследования динамического взаимодействия мостовых конструкций и высокоскоростного подвижного состава должны быть адаптированы с учетом сложного характера распределения

нагрузок на колеса и оси с учетом бокового ветра и процессов аэродинамического взаимодействия с мостовой конструкцией. Таким образом, задача комплексного исследования вопросов аэродинамического взаимодействия, движущегося высокоскоростного подвижного состава с объектами железнодорожной инфраструктуры и искусственных сооружений с целью уточнения особенностей контактного взаимодействия колеса и рельса, а также и разработки на этой основе рекомендаций по повышению энергоэффективности и безопасности процесса перевозок является актуальной.

1.4 Обоснование выбора участка для исследования

Территория России, согласно ГОСТ 16350-80 «Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей» [25, 26], делится на 7 ветровых зон в зависимости от повторяемости ветров, дующих со скоростями свыше 12 м/с (см. рис. 1.5).

Для анализа ветрозависимых районов Российской Федерации, влияющих на энергоэффективность железнодорожного транспорта, необходимо учитывать климатические и географические критерии ветрозависимых зон, т. е. вид местности, а именно: равнинная открытая местность, для которой характерно отсутствие естественных преград (гор, лесов), усиливающих ветровое воздействие.

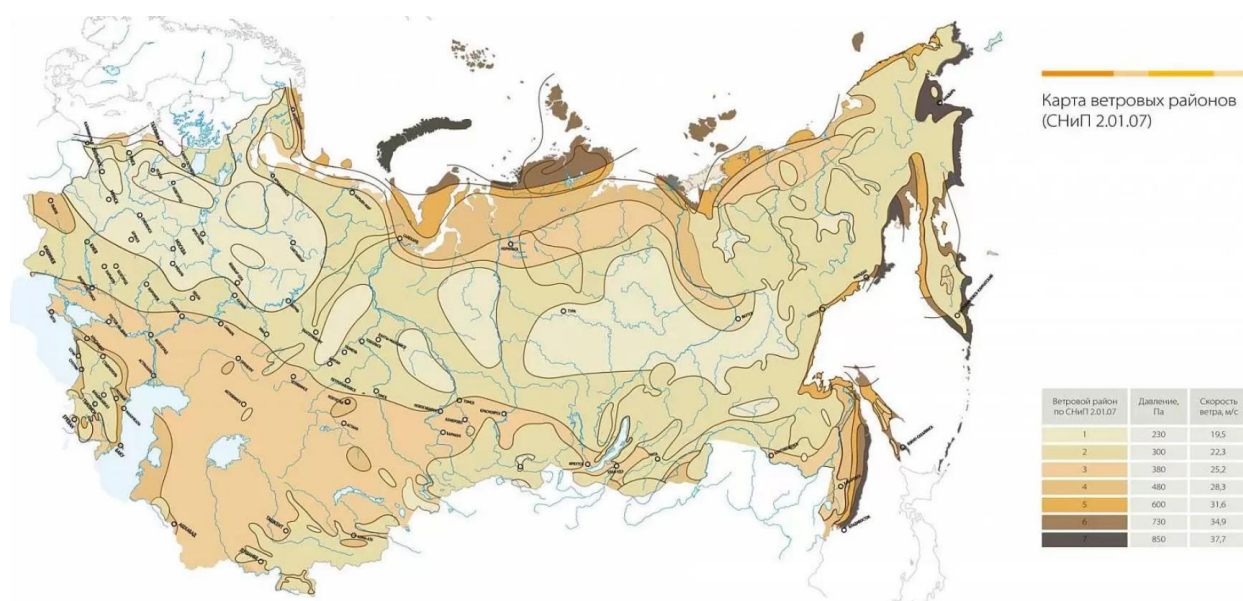


Рисунок 1.5 – Карта ветровых районов Российской Федерации

К основным ветрозависимым регионам России относятся:

- Западная Сибирь (Кулундинская степь, Барабинская низменность) – участки Транссиба (например, Омск – Новосибирск).
- Прикаспийская низменность (Астраханская область, Калмыкия).
- Европейский юг (Ростовская область, Ставропольский край).
- Кольский полуостров (Мурманская область) – ветра Баренцева моря влияют на участки Октябрьской железной дороги.

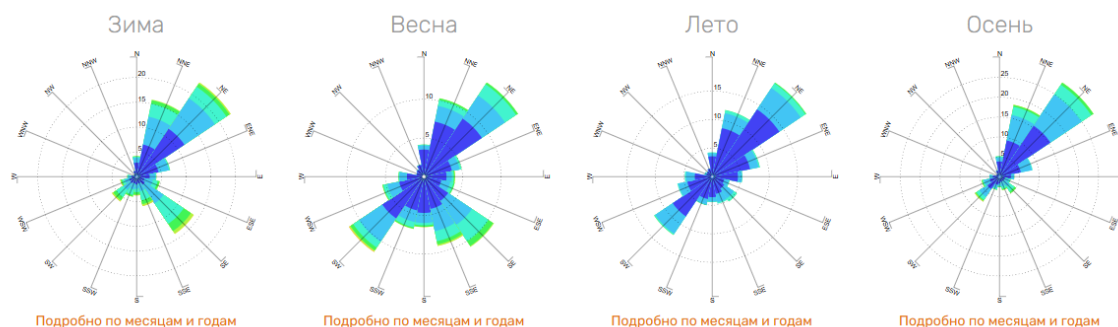
Для исследования был выбран участок Туапсе-Адлер Северо-Кавказской железной дороги (см. рис. 1.6) [27-29].



Рисунок 1.6 Прибрежный участок Туапсе – Адлер

Здесь практически 90 километров пути проходят вдоль береговой линии, подверженной эрозии и постоянному перемещению наносов, а также сильным штормам, которые могут достигать 8 баллов (17-20 м/с). Согласно данным [30] на территории, на которой расположен данный участок, дуют ветра со скоростями 12 м/с и выше чаще, чем 53 дня в году (рисунок 1.7).

а)



б)

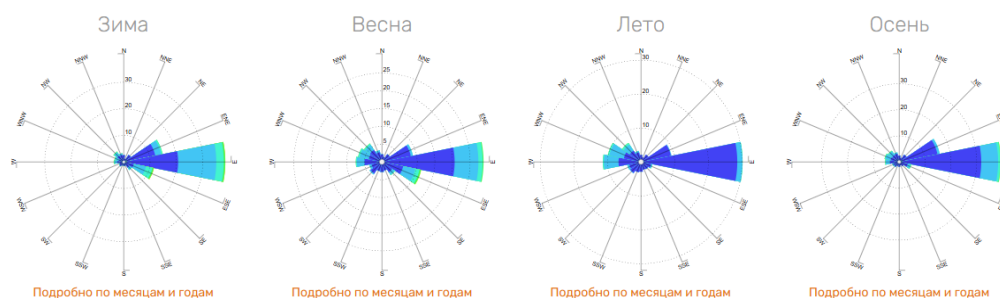


Рисунок 1.7 Роза ветров в г. Туапсе (а) и Сочи (б)

Этот участок в перспективе может быть включен в зону обращения высокоскоростных поездов. Наличие большого количества искусственных сооружений, а также слабых грунтов делает возможным исследовать вопросы взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с искусственными сооружениями, установленными на грунты в пониженной несущей способности, в условиях повышенных ветровых нагрузок.

Выводы по главе 1

1. Основными недостатками существующих методов анализа процессов аэродинамического взаимодействия элементов системы «поезд – мост» является неполный учет особенностей конструкции мостовой фермы и особенностей распределения в ней воздушных масс, которые вызывают дополнительные колебания и механические нагрузки, действующие на высокоскоростной подвижной состав и в неблагоприятных условиях способствующие возникновению резонансных явлений, перераспределению нагрузок в парах «колесо – рельс» и, как следствие потере устойчивости;

2. Проанализированы методы исследования аэродинамики высокоскоростных поездов. Показано, что наиболее эффективным методом исследования аэродинамики высокоскоростных поездов являются методы численного моделирования на базе методов конечных элементов в трехмерной нестационарной постановке.

3. В исследованиях механических процессов взаимодействия поезда и мостовой конструкции, в том числе колебательных процессов недостаточно изучены вопросы колебаний, обусловленных аэродинамическими воздействиями на мостовую конструкцию, а также степень и характер влияния процессов аэродинамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава и мостовой фермы, на форму и характер колебаний мостовой конструкции.

4. Показана необходимость адаптации и установления границ применимости существующих методик анализа процессов в контактной паре «колесо – рельс» применительно к условиям высокоскоростного движения по мостовым конструкциям в условиях 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 при сильном боковом ветре.

5. Показана необходимость разработки рекомендаций и технических решений по повышению энергоэффективности и безопасности процесса перевозок на основе анализа контактного взаимодействия подвижного состава и искусственных сооружений при интенсивном воздействии ветровой нагрузки.

6. Определены зоны, расположенные в ветрозависимых районах. В качестве участка для исследования выбран участок Туапсе – Адлер Северо-Кавказской железной дороги филиала ОАО «РЖД», находящийся в прибрежной зоне и подверженный интенсивному штормовому воздействию.

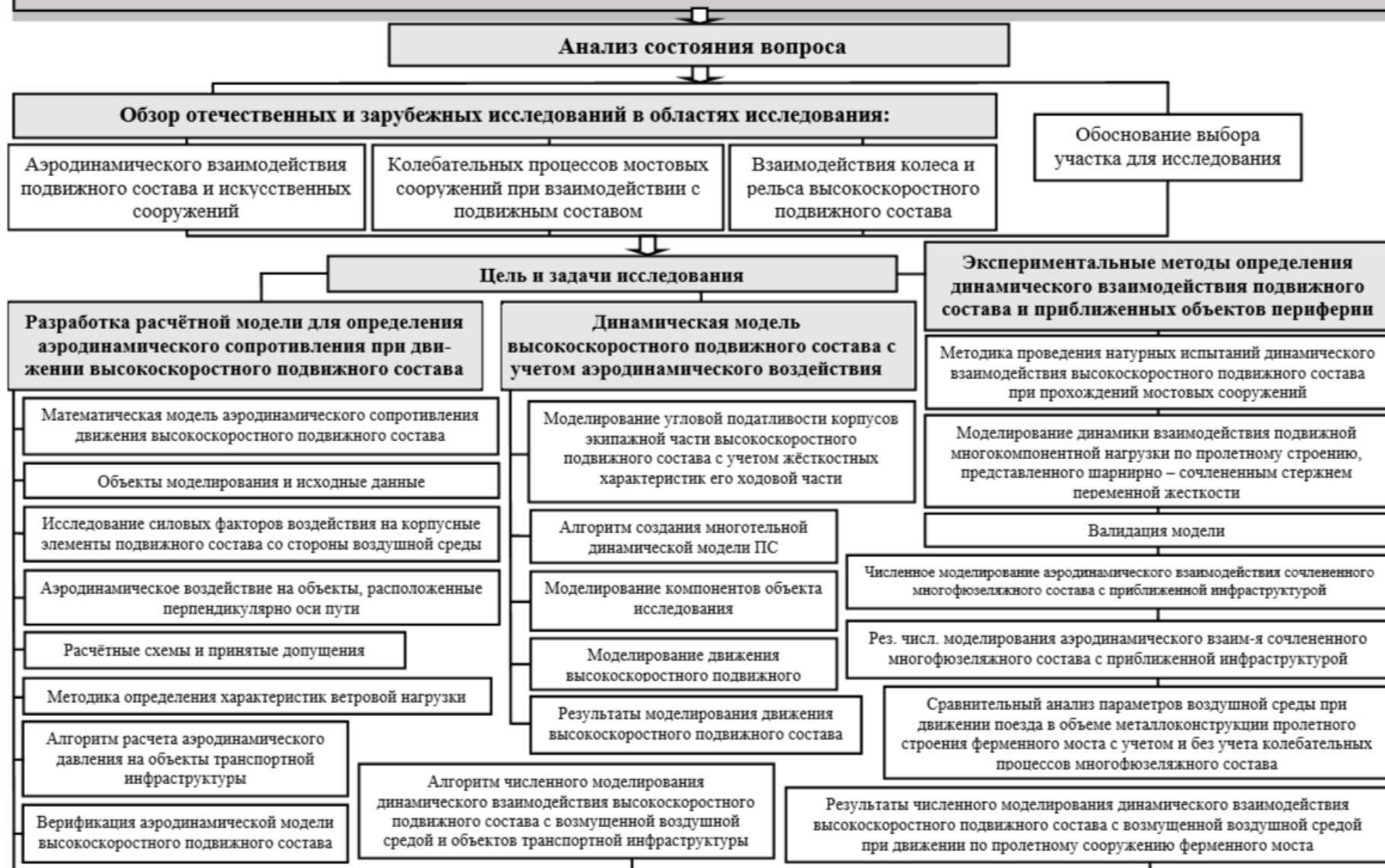
7. Для участков, проходящих через ветрозависимые районы (равнинные открытые местности, прибрежные зоны), необходимо разрабатывать специальные рекомендации и технические решения для повышения энергоэффективности и безопасности.

8. Необходимо установить границы применимости существующих в современной инженерной практике методов и адаптировать их для учёта совместного влияния аэродинамических нагрузок, колебаний конструкции моста, резонансных явлений и динамики пути с учётом специфических климатических условий.

9. При проектировании новых и оценке существующих пролётных строений необходимо производить расчёт их аэродинамического влияния на поток воздуха, увлекаемый поездом, с учётом скоростного режима движения ПС, для оценки риска возникновения периодических вихревых воздействий, способных вызвать резонанс.

Структурно-логическая схема диссертационного исследования и последовательность выполнения расчетно-экспериментальной части приведена на рисунке 1.8.

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



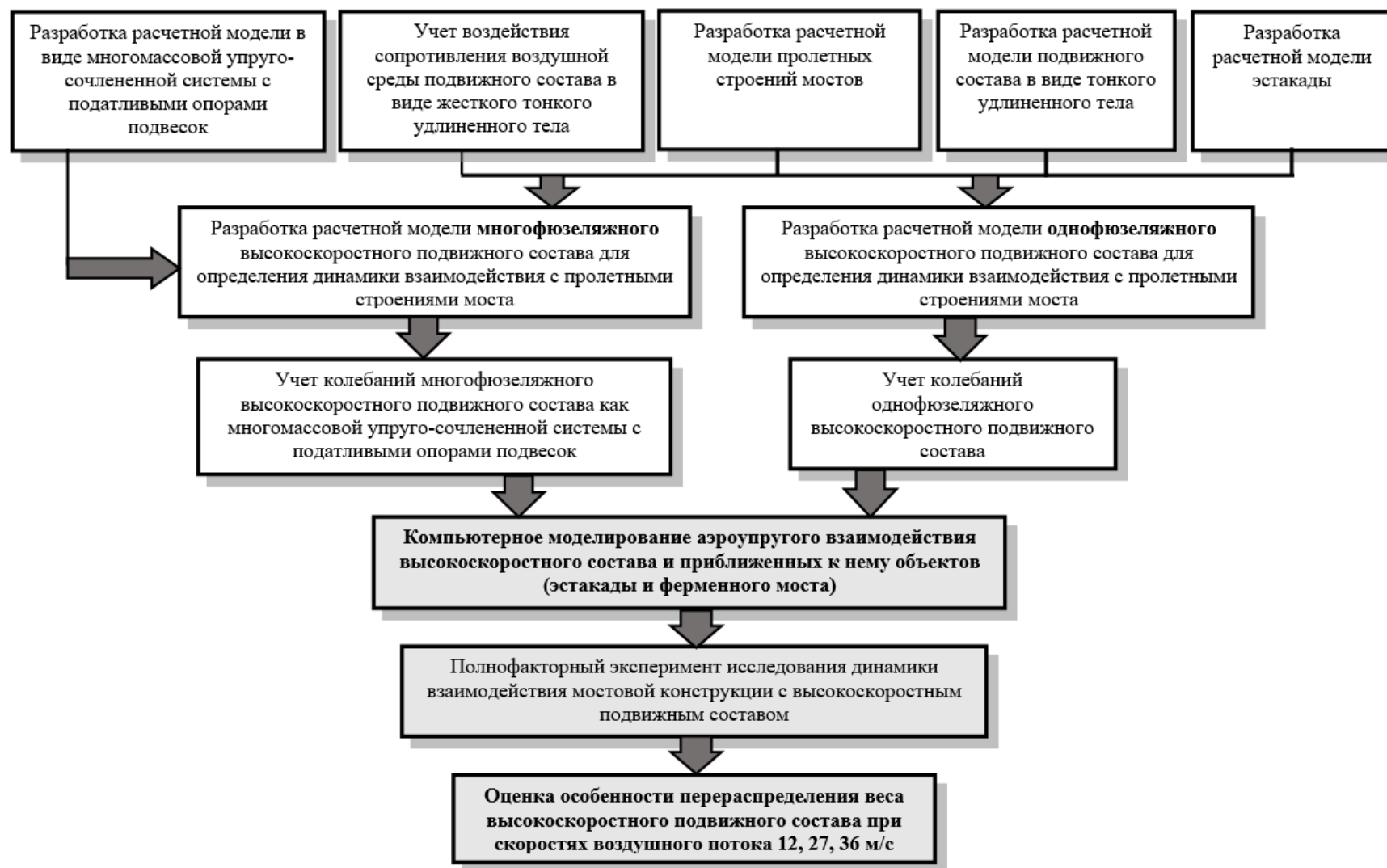


Рисунок 1.8 – Структурно-логическая схема диссертационного исследования и последовательность выполнения расчетно-экспериментальной части

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

2.1. Математическая модель аэродинамического сопротивления движения высокоскоростного подвижного состава

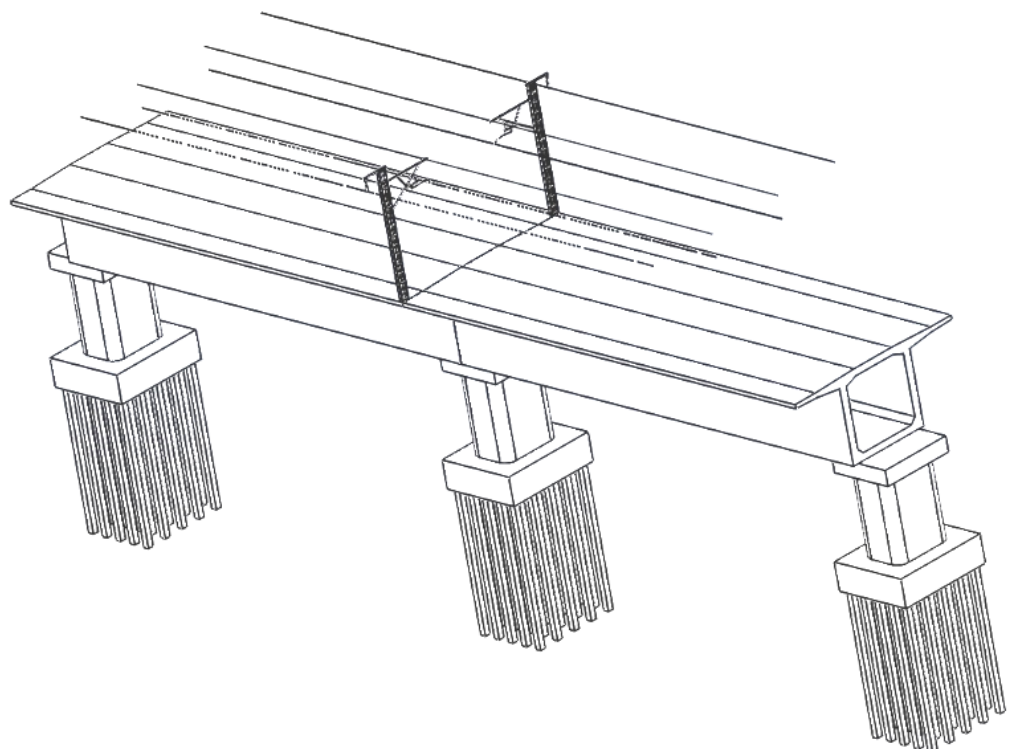
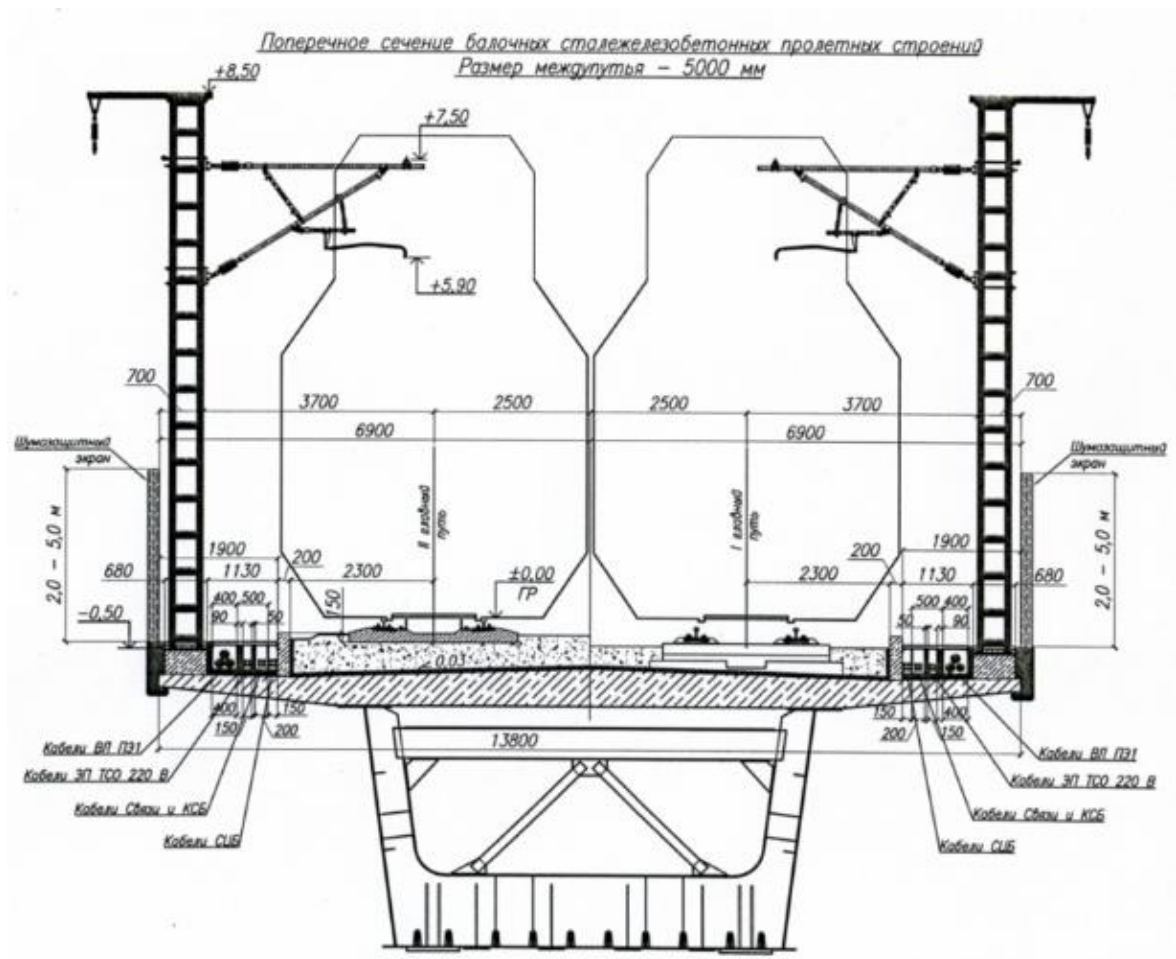
Математическое моделирование процесса потери устойчивости подвижного состава выполнено на основе [31-36] составления и решения дифференциальных уравнений, описывающих вынужденные колебания двухмассовой системы, находящейся под воздействием внешних силовых факторов возмущения гармонического характера, с ограничением [2, 3, 10, 37-45] по критерию смещения проекции центра масс вагона под воздействием системы возмущающих подъемных и боковых аэродинамических сил.

С этой целью разработки математической модели необходимо:

1. Составить расчетную схему для определения аэродинамического давления на корпус движущегося поезда методом конечных объемов используя подходы теории упругости;
2. Определить механизм формирования воздушного сопротивления высокоскоростного состава типа «Сапсан» (Velaro Rus) при его движении по эстакаде определенной высоты в условиях воздействия бокового ветра;
3. Определить динамический отклик упруго – податливой подвески подвижного состава на возмущение от аэродинамического воздействия;
4. Определить усилия в контактных группах «ходовые колеса – головка рельса» при различных скоростях движения состава и скорости бокового ветра.

2.2. Объекты моделирования и исходные данные

Расчётным подвижным составом был принят высокоскоростной электропоезд на платформе Siemens Velaro, в частности, – Velaro RUS (ЭВС2 «Сапсан»). Основные характеристики данного поезда представлены в [46, 47]. Для расчета влияния ветровой нагрузки на движущийся подвижной состав, представляемый в виде многофюзеляжной системы с упруго – дисси-



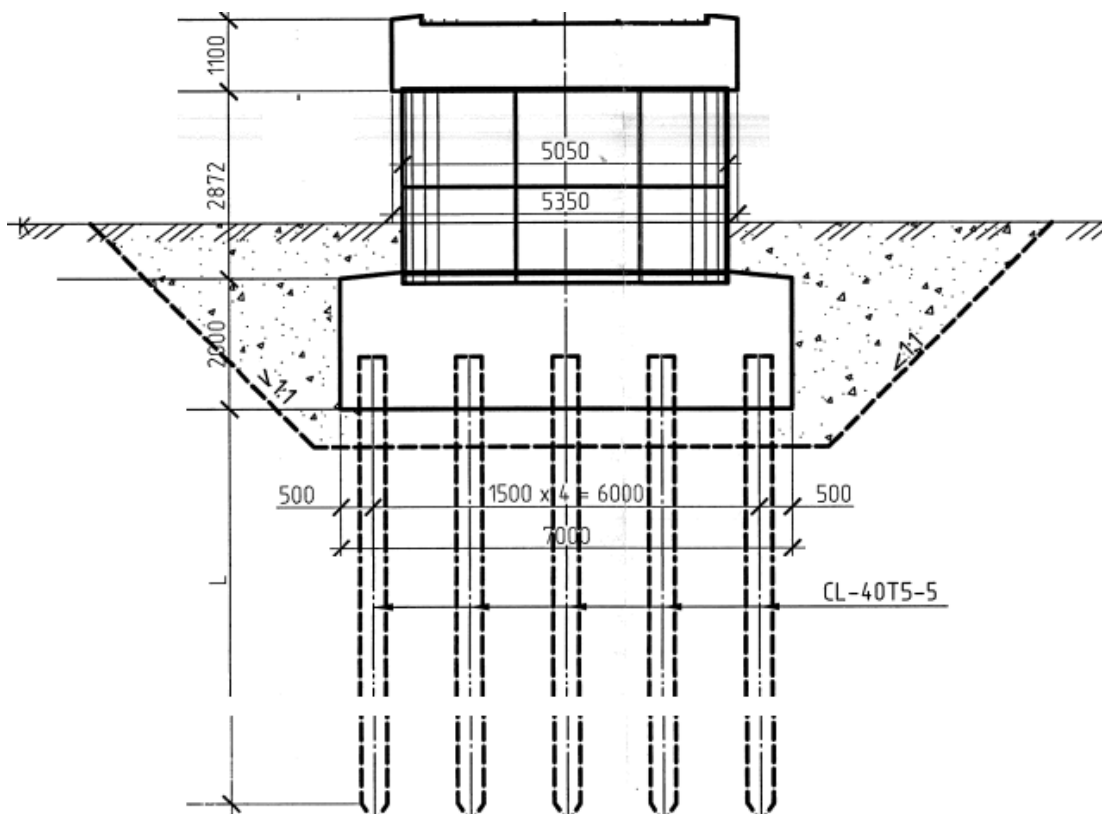
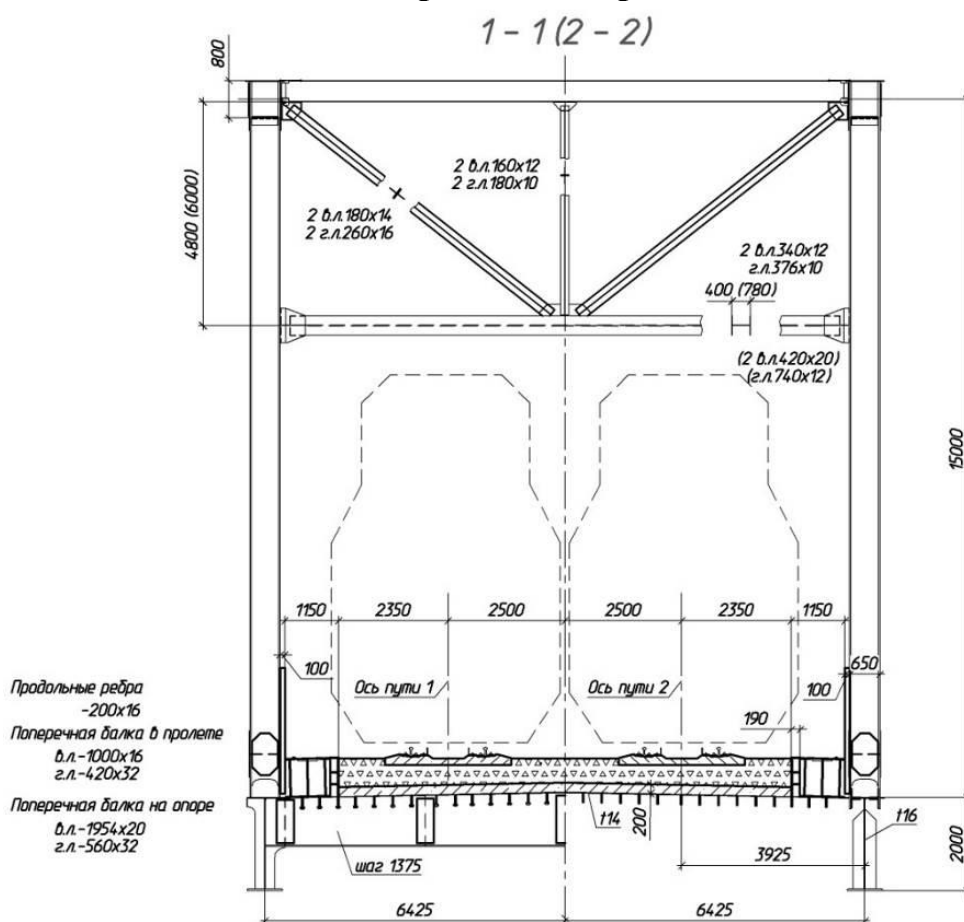
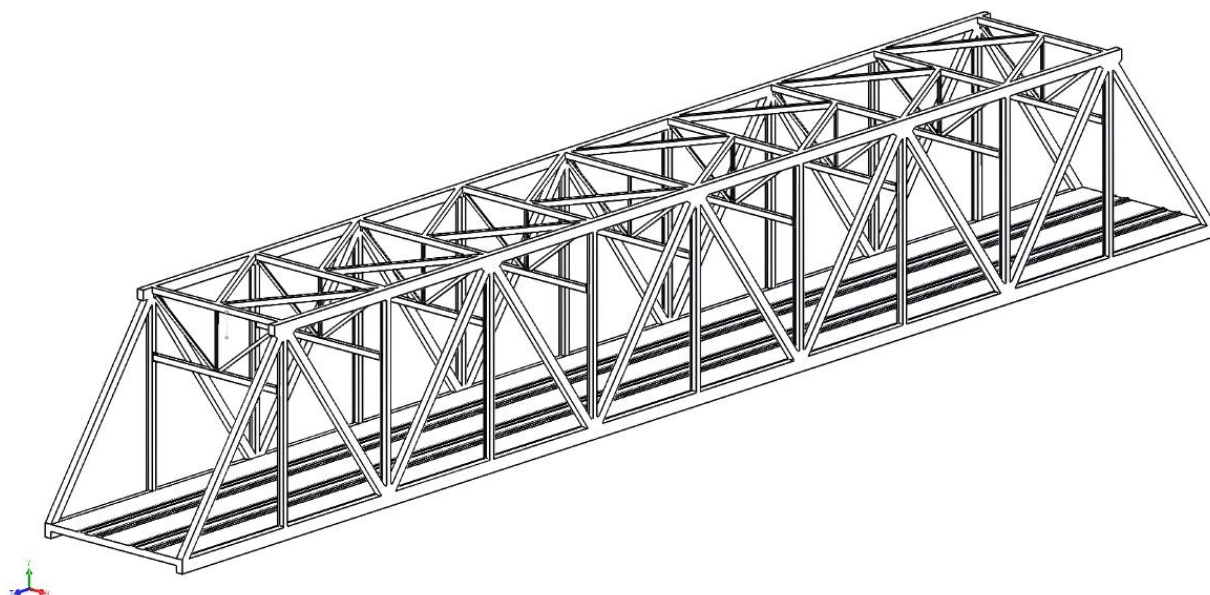


Рисунок 2.2 – Геометрическая модель эстакады

Сечение пролетного строения



3d – модель пролетного строения железнодорожного моста



Устройство опоры моста

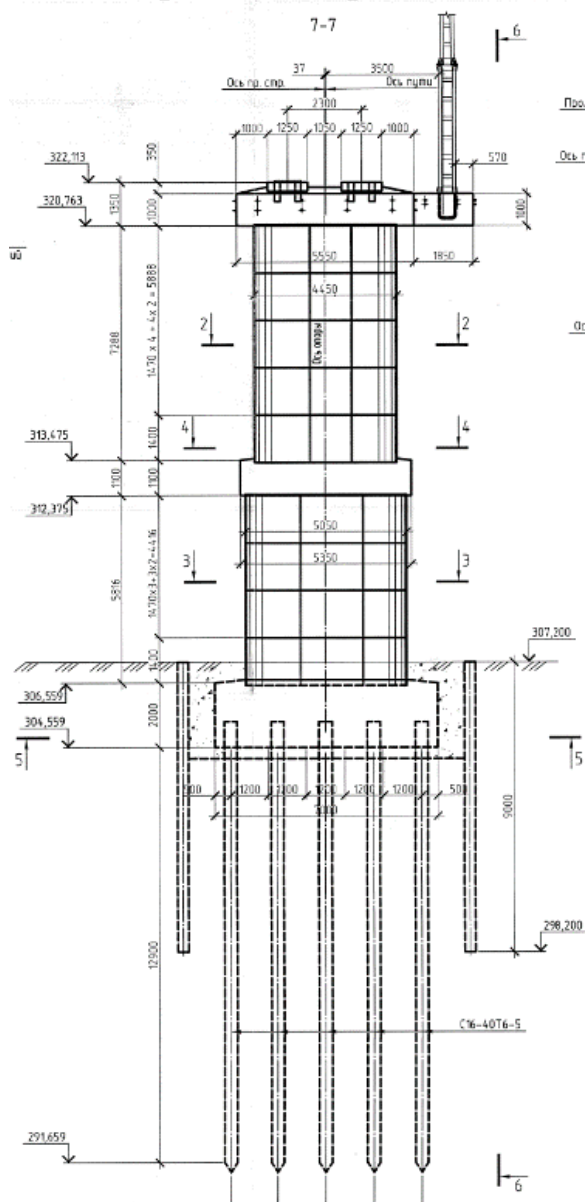


Рисунок 2.3 – Геометрическая модель пролетного строения ферменного моста

2.3 Исследование силовых факторов воздействия на корпусные элементы подвижного состава со стороны воздушной среды

Взаимодействие воздушной среды с корпусными элементами высокоскоростного подвижного состава (ВСПС) условно можно разделить на два типа: взаимодействие с боковой ветровой нагрузкой, и с возмущенной воздушной средой, сгенерированной вытеснением объемов воздушной среды корпусом ВСПС.

В процессе движения высокоскоростного подвижного состава в непосредственной близости от поверхности кузова в результате вытеснения и уплотнения воздушной среды формируются зоны колебания давления и плотности в зонах головного и хвостового вагонов (рис. 2.4).

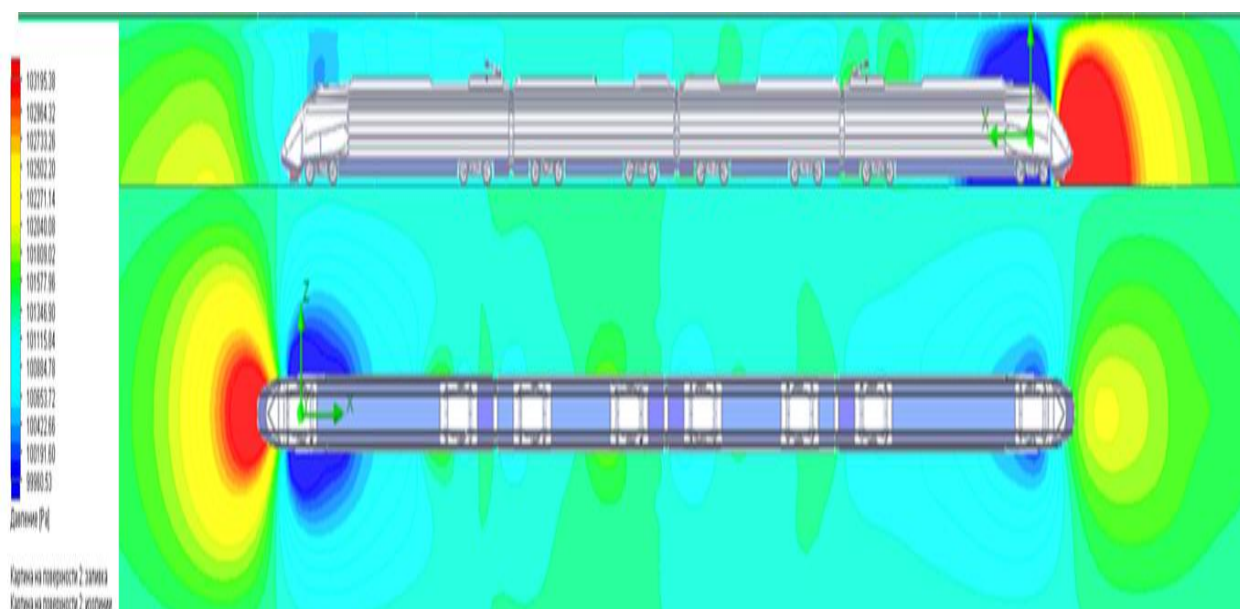


Рисунок 2.4 – Знакопеременный импульс давления головной воздушной волны по оси пути

Размеры и форма уплотненной/разряженной зоны определяются нормативными документами, профильным сопротивлением корпусных элементов подвижных единиц поезда, длиной состава, и значением скорости движения [13, 50-57].

Механическое воздействие воздушного импульса реализуется за счет постепенного расширения ускоренно уплотненной области воздушной среды, образующейся в районе головного обтекателя состава, и, также за счет инерционного наддува воздушных масс, увлеченных движением поезда.

Энергия механического воздействия воздушного потока характеризуется суммой потенциальной компоненты энергии потока (воздействие молекул воздуха друг на друга в потоке), и – кинетической (инерционный наддув воздушных масс) (рис. 2.5).

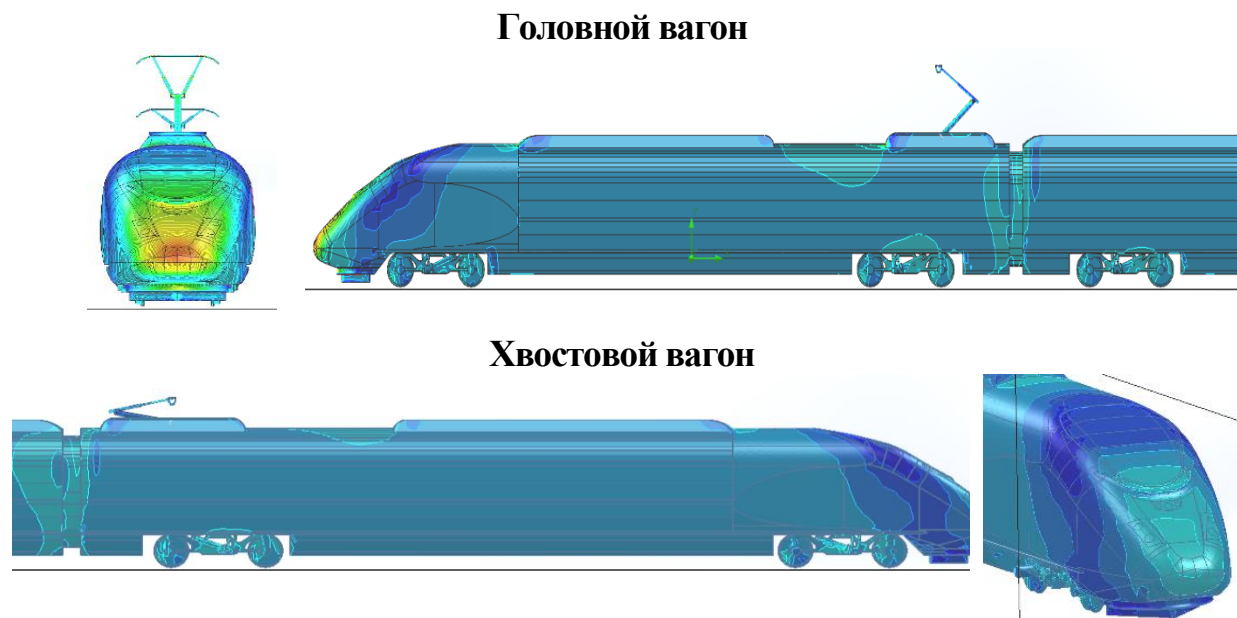


Рисунок 2.5 – Эпюры распределения избыточного давления воздушной среды на поверхности ВСПС

Динамическая компонента инерционного наддува воздушных масс (скоростной напор) характеризуется плотностью среды – это параметр, который определяет силовое воздействие атмосферы на некоторое тело при их взаимном движении [11-13, 42].

Динамическое давление на поверхности, расположенные перпендикулярно оси пути в виде скоростного напора p_d вычисляется по формуле (2.1).

$$p_d = \rho \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (2.1)$$

где $\rho = 1,2$ – удельный вес воздуха, кг/м³;

$g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м/с²;

V – скорость потока (см. табл. 2.2-2.5), м/с.

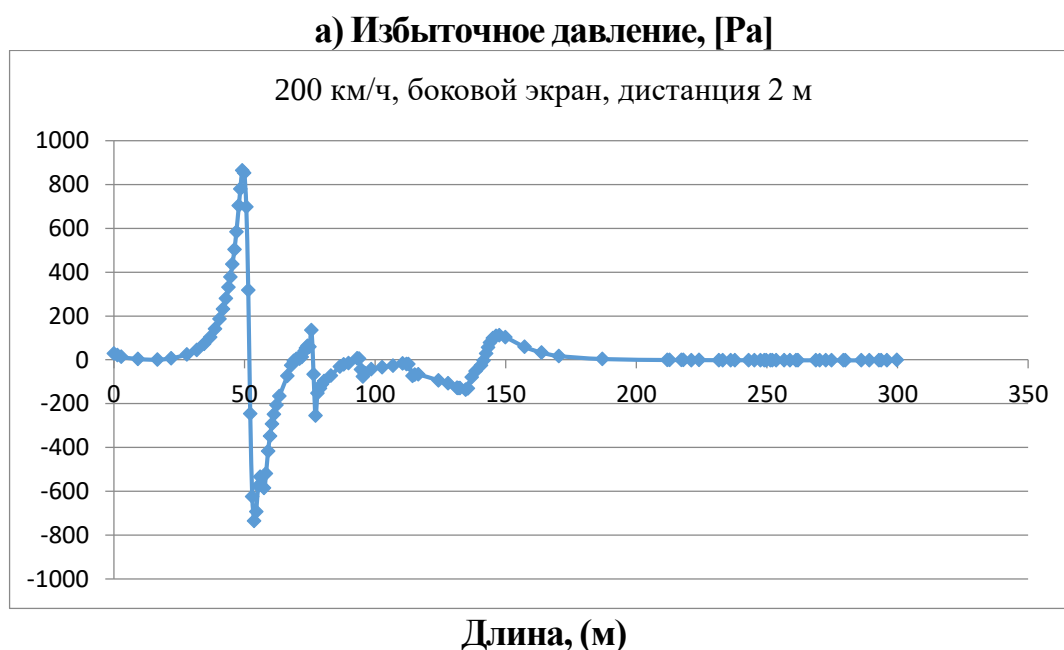
Ввод значений скорости потока производится в выделенной ячейке программного комплекса Microsoft Excel (рис. 2.6)

$P_d = \rho \cdot (V^2 / 2 \cdot g)$		29,6 Па	290,38 Па	
$\rho =$	1,2	- плотность воздуха, кг/м ³		
$g =$	9,81	- ускорение свободного падения, м/сек ²		
Вставить значение скорости потока V, м/сек				
промежуточные значения определить по интерполяции				
V =	22	- скорость потока, м/сек		

Рисунок 2.6 – Макрос расчета p_d в программном комплексе Microsoft Excel для определения инерционного наддува воздушных масс

Максимальную амплитуду давления имеет знакопеременный импульс, образующийся в районе головного обтекателя поезда. Область разрежения, формирующаяся на хвостовом обтекателе состава, по амплитуде значительно меньше головного импульса, характеризуется высокой турбулентностью, с образованием струйно-отрывных течений воздушной среды. Минимальные по амплитуде возмущения возникают на участках ниш ходовых устройств, междвагонных промежутков, устройств токосъема (рис. 2.5).

Колебания плотности среды (рис. 2.7, а) вызывает неизбежное образование волны сжатия (длина фронта 15 – 20 м) или, если скорость распространения возмущений уменьшается с ростом плотности, будет наблюдаться волна разрежения (2 – 3 м).



б) Схема импульса давления в головной части поезда

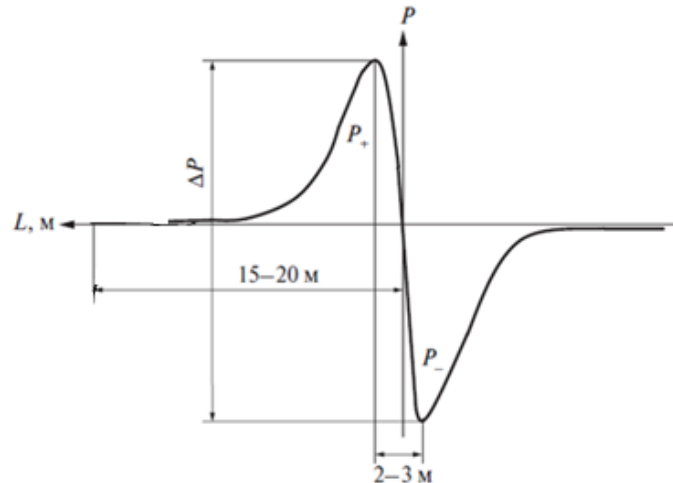


Рисунок 2.7 – Знакопеременный импульс давления головной воздушной волны: а – график импульса давления; б – схема импульса головной части поезда

Колебания плотности среды (рис. 2.7, б) вызывает неизбежное образование волны сжатия (длина фронта 15 – 20 м) или, если скорость распространения возмущений уменьшается с ростом плотности, будет наблюдаться волна разрежения (2 – 3 м).

Размеры и форма фронта расходящейся воздушной волны определяются формой головного обтекателя поезда, его длиной и скоростью движения (рис. 2.8, а).

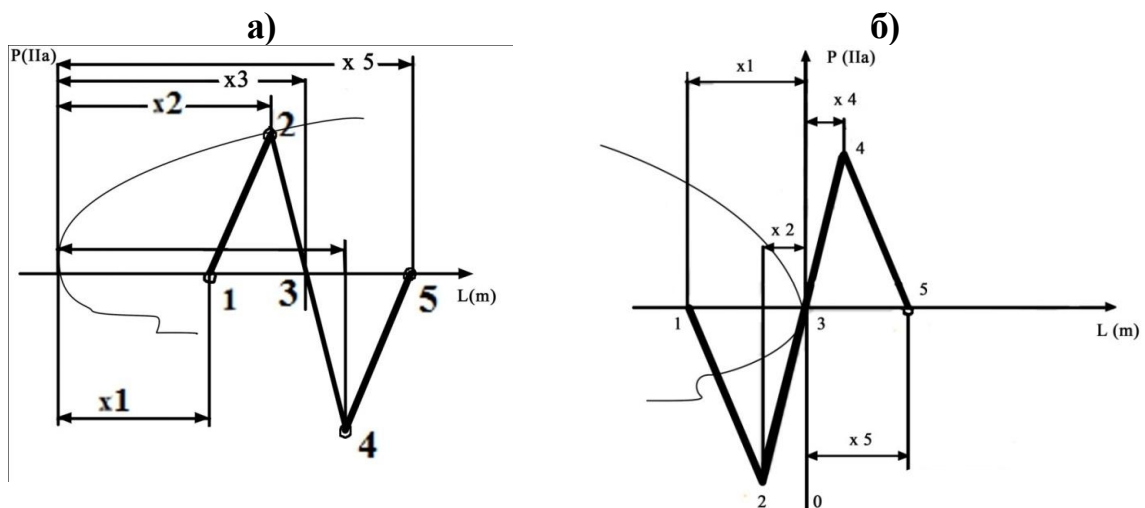


Рисунок 2.8 – Схема импульса давления: а) на головной части поезда по оси пути; б) на хвостовой части поезда по оси пути

Схема импульса давления на хвостовой части поезда по оси пути (рис. 2.8, б.). Начало системы координат (рис. 2.8) для головного вагона – крайняя точка габарита головного обтекателя ($0=50$ м для данных эксперимента);

для хвостового вагона – крайняя точка габарита хвостового обтекателя (0=138 м для данных виртуального эксперимента).

Формализация представления конфигурации импульса давления головной воздушной волны выполняется кусочно-линейной аппроксимацией по точкам экстремума функции.

В таблицах 2.2-2.5 представлены величины аэродинамического давления при скоростях движения 200 и 400 км/ч.

Таблица 2.2 – Значения давления на вертикальную плоскую поверхность, расположенную параллельно оси пути

№ линии индикации	Избыточное давление в характеристических точках (дистанция от передней кромки головного обтекателя по ходу движения) (Па)									
	1		2		3		4		5	
	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па
Головной обтекатель (дистанция 2 м)										
1	-16	0	0	0,63	2	0	3	-0,49	20	0
2	-16	0	0	0,86	2	0	3	-0,84	20	0
3	-16	0	0	1	2	0	3	-0,85	20	0
4	-16	0	0	0,89	2	0	3	-0,76	20	0
5	-16	0	0	0,67	2	0	3	-0,51	20	0
Хвостовой обтекатель (дистанция 2 м)										
1	-28	-0,01	-4	-0,11	0	0	8	0,11	50	0
2	-28	-0,02	-4	-0,14	0	0	8	0,12	50	0
3	-28	-0,02	-4	-0,14	0	0	8	0,12	50	0
4	-28	-0,02	-4	0,13	0	0	8	0,11	50	0
5	-28	-0,01	-4	0,12	0	0	8	0,11	50	0
Головной обтекатель (дистанция 4 м)										
1	-12	0	-3	0,40	2	0	5	-0,28	20	0
2	-12	0	-3	0,46	2	0	5	-0,37	20	0
3	-12	0	-3	0,47	2	0	5	-0,37	20	0
4	-12	0	-3	0,48	2	0	5	-0,36	20	0
5	-12	0	-3	0,42	2	0	5	-0,33	20	0
Хвостовой обтекатель (дистанция 4 м)										
1	-28	-0,01	-5	-0,14	0	0	5	0,09	44	0
2	-28	-0,01	-5	-0,17	0	0	5	0,1	44	0
3	-28	-0,02	-5	-0,17	0	0	5	0,09	44	0
4	-28	-0,01	-5	-0,16	0	0	5	0,1	44	0
5	-28	-0,01	-5	-0,17	0	0	5	0,09	44	0

Примечания: $P_{\max} = 864$ – экстремальное значение давления, Па; рассматриваются величины давления в пределах 10 % от максимального; Значения в таблице нормированы относительно максимального значения.

Таблица 2.3 – Значения давления на горизонтальную плоскую поверхность, установленную параллельно плоскости пути

№ линии индикации	Избыточное давление в характеристических точках (дистанция от передней кромки головного обтекателя по ходу движения) (Па)									
	1		2		3		4		5	
	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па
Головной обтекатель (расстояние от головки рельса 5 м)										
1	-18	0	0	0,79	2,6	0	4	-1	7	0,01
Хвостовой обтекатель (расстояние от головки рельса 5 м)										
1	1	-0,10	-5	-0,54	0	-0,01	4	0,24	16	-0,02
Головной обтекатель (расстояние от головки рельса 6 м)										
1	-16	0,02	1	0,40	2	0,00	4	-0,6	18	-0,01
Хвостовой обтекатель (расстояние от головки рельса 6 м)										
1	1	-0,10	5	-0,10	0	-0,11	4	0,14	17	-0,14
Головной обтекатель (расстояние от головки рельса 7 м)										
1	-14	0	-3	0,26	2	-0,03	6	-0,34	19	-0,05
Хвостовой обтекатель (расстояние от головки рельса 7 м)										
1	-30	-0,05	-6	-0,33	0	-0,07	3	0,08	17	0
Головной обтекатель (расстояние от головки рельса 8 м)										
1	-11	0,00	-2	0,13	1	0,00	7	-0,31	19	-0,09
Хвостовой обтекатель (расстояние от головки рельса 8 м)										
1	-30	-0,09	-7	-0,28	0	0,0	4	0,03	12	0,0

Примечания: $P_{\max} = 1188$ – экстремальное значение давления, Па; рассматриваются величины давления в пределах 10 % от максимального.

Таблица 2.4 – Значения давления на горизонтальную поверхность в характерных точках головного и хвостового обтекателей

№ линии индикации	Избыточное давление в характеристических точках (дистанция от передней кромки головного обтекателя по ходу движения) (Па)									
	1		2		3		4		5	
	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па
Головной обтекатель (расстояние от головки рельса 5 м)										
	0	0	18	0,81	21	0	28	1	38	0
Хвостовой обтекатель (расстояние от головки рельса 5 м)										
	11	0	15	-0,44	18	0	20	0,25	36	0
Головной обтекатель (расстояние от головки рельса 6 м)										
1	0	0,05	18	0,4	21	0,07	28	-0,4	38	-0,08
Хвостовой обтекатель (расстояние от головки рельса 6 м)										
1	11	0,00	15	-0,36	18	-0,02	20	0,2	36	-0,02
Головной обтекатель (расстояние от головки рельса 7 м)										
1	0	0,03	18	0,25	21	0,03	27	-0,23	39	-0,11
Хвостовой обтекатель (расстояние от головки рельса 7 м)										
1	12	-0,02	15	-0,25	18	-0,06	20	0,2	35	-0,03
Головной обтекатель (расстояние от головки рельса 8 м)										
1	0	0,02	17	0,17	21	0,00	27	-0,2	38	-0,15
Хвостовой обтекатель (расстояние от головки рельса 8 м)										
1	12	-0,02	16	-0,18	17	-0,01	21	0,1	32	-0,01

Примечания: $P_{\max} = 5083$ – экстремальное значение давления, Па; рассматриваются величины давления в пределах 10 % от максимального.

Таблица 2.5 – Значения давления на плоскую вертикальную поверхность в характерных точках головного и хвостового обтекателей

№ линии индикации	Избыточное давление в характеристических точках (дистанция от передней кромки головного обтекателя по ходу движения) (Па)									
	1		2		3		4		5	
	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Головной обтекатель (дистанция 2 м)										
1	-35	0,00	-1	0,95	1	0,12	3,5	-0,46	25	0,04
2	-35	0,00	-1	0,98	1	0,11	3,5	-0,5	25	0,03
3	-35	0,00	-1	1	1	0,12	3,5	-0,6	25	0,05
4	-35	0,00	-1	0,99	1	0,12	3,5	-0,58	25	0,03
5	-35	0,00	-1	0,99	1	0,12	3,5	-0,36	25	0,03
Хвостовой обтекатель (дистанция 2 м)										
1	-28	0,00	-5	-0,07	3	0,00	7	0,105	39	0,00
2	-29	0,00	-4	-0,07	3	0,00	8	0,106	38	0,00
3	-29	0,00	-4	-0,07	3	0,00	7	0,107	40	0,00
4	-29	0,00	-4	-0,07	3	0,00	7	0,107	40	0,00
5	-28	0,00	-3	-0,07	3	0,00	8	0,096	39	0,00
Головной обтекатель (дистанция 4 м)										
1	-32	0,00	-3	0,27	1	0,02	4	-0,23	26	0,00
2	-32	0,00	-3	0,28	1	0,02	4	-0,23	27	0,00
3	-34	0,00	-3	0,3	1	0,02	4	-0,31	24	0,00
4	-34	0,00	-3	0,28	1	0,02	4	-0,27	25	0,00
5	-32	0,00	-3	0,28	1	0,02	4	-0,27	25	0,00
Хвостовой обтекатель (дистанция 4 м)										
1	-30	0,00	-3	-0,10	3	0,01	8	0,04	55	0,00
2	-30	0,00	-2	-0,10	3	0,01	8	0,05	55	0,00
3	-30	0,00	-4	-0,13	3	0,01	8	0,06	56	0,00
4	-30	0,00	-4	-0,13	3	0,01	8	0,06	55	0,00
5	-29	0,00	-3	-0,13	3	0,01	8	0,06	54	0,00
Головной обтекатель (дистанция 6 м)										
1	-30	0,00	-3	0,05	1	0,01	4	-0,06	22	0
2	-30	0,00	-4	0,08	0	0,03	4	-0,08	22	0
3	-30	0,00	-4	0,12	1	0,03	5	-0,11	23	0
4	-31	0,00	-4	0,1	1	0,03	5	-0,08	23	0
5	-30	0,00	-3	0,08	0	0,02	3	-0,06	23	0
Хвостовой обтекатель (дистанция 6 м)										
1	-30	0,00	-7	-0,04	0	0,00	5	0,05	45	0,00
2	-30	0,00	-7	-0,05	0	0,00	5	0,05	45	0,00
3	-30	0,00	-8	-0,05	0	0,00	5	0,06	45	0,00
4	-30	0,00	-8	-0,05	0	0,00	5	0,06	45	0,00
5	-30	0,00	-7	-0,05	0	0,00	5	0,05	45	0,00
Головной обтекатель (дистанция 8 м)										
1	-30	0,00	-2	0,04	0	0,00	5	-0,06	23	0,00
2	-34	0,00	-2	0,07	1	0,00	6	-0,06	24	0,00
3	-36	0,00	-4	0,095	1	0,00	7	-0,095	24	0,00
4	-36	0,00	-4	0,09	1	0,00	7	-0,08	24	0,00
5	-35	0,00	-3	0,07	0	0,00	4	-0,07	24	0,00

Продолжение таблицы 2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Хвостовой обтекатель (дистанция 8 м)										
1	-28	0,00	3	-0,04	0	0,00	14	0,03	47	0,00
2	-30	0,00	1	-0,04	0	0,00	16	0,03	46	0,00
3	-30	0,00	-8	-0,04	-1	0,00	6	0,04	47	0,00
4	-30	0,00	-8	-0,03	-1	0,00	5	0,04	47	0,00
5	-26	0,00	2,5	-0,01	0	0,00	15	0,04	47	0,00

Примечания: $P_{\max} = 4845$ – экстремальное значение давления, Па; рассматриваются величины давления в пределах 10 % от максимального.

Настройка модели производилась для скорости 200 км/ч с целью применения проверки по методике ЕВРОКОД-1 [58]. Схема расположения индикаторных линий на вертикальной и горизонтальной поверхностях (рис. 2.9).

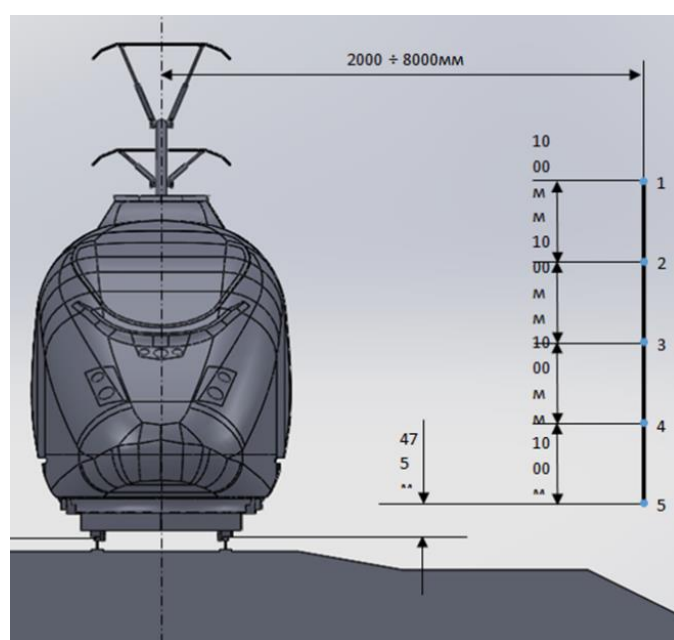


Рисунок 2.9 – Схема расположения индикаторных линий на вертикальной и горизонтальной поверхностях

2.4. Аэродинамическое воздействие на объекты, расположенные перпендикулярно оси пути

Активная зона возмущенной воздушной среды геометрически может быть представлена усеченной пирамидой с площадью верхнего основания равной среднему сечению поезда, и нижнего, – 3...4 площади верхнего. Эффективная зона аэродинамического взаимодействия определяется участком от поверхности состава до максимально удаленной точки значимых скоростей потока.

Схема зон распределения скоростей в потоке (вертикальная и горизонтальная плоскость) представлена на рисунке 2.10. Координаты зоны опреде-

ляются от участка за головным обтекателем и относительно крайней точки хвостового обтекателя (рис. 2.10).

Скорость потока воздушной среды в эшелоне в *вертикальной плоскости*, а также распределение средней скорости потока в эшелоне представлены в таблицах 2.6 и 2.7 соответственно.



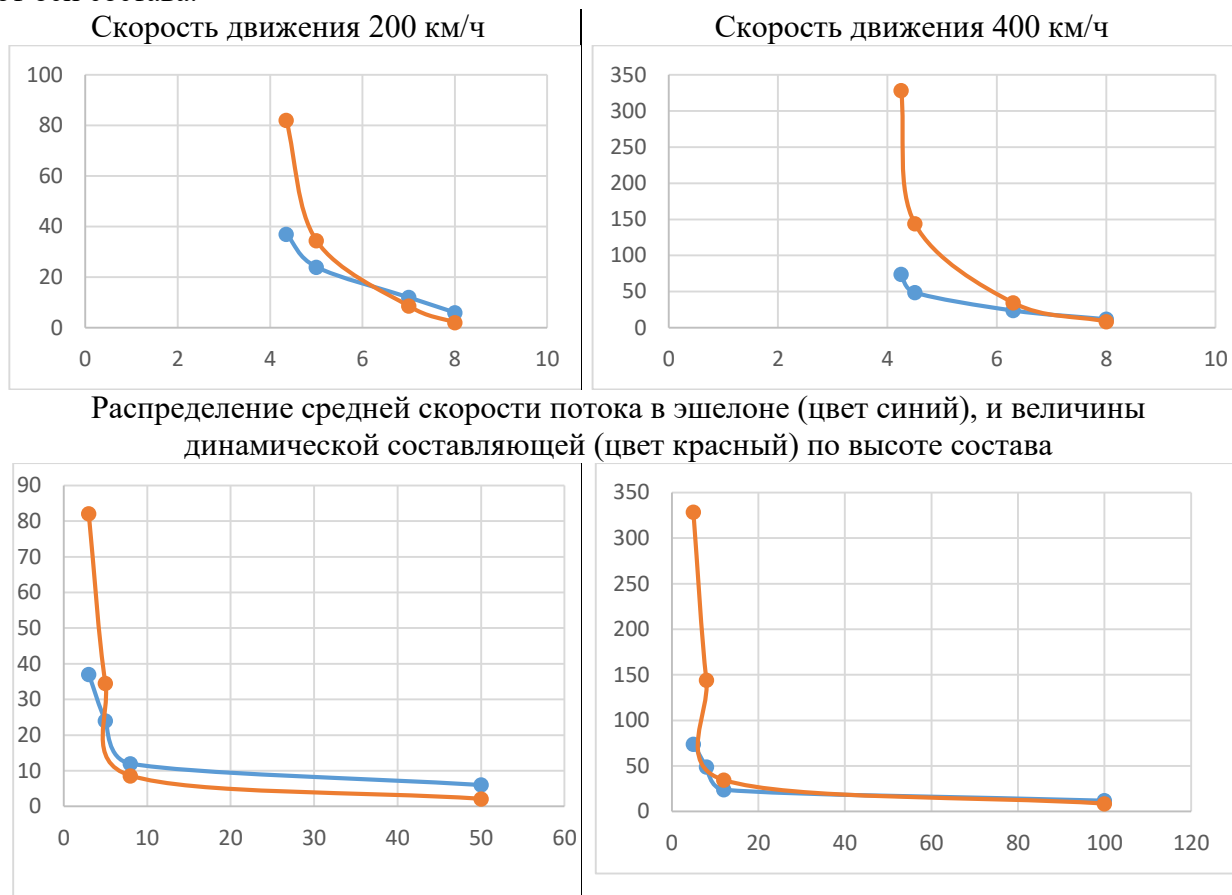
Рисунок 2.10 – Конфигурация зон распределения скоростей в потоке

В результате исследования установлено, что на скоростях 200 и 400 км/ч в вертикальной плоскости турбулентные явления возмущенной среды возникают в зоне непосредственной близости от поверхности экипажной части подвижного состава в пределах 4 ... 6 м по высоте от уровня верха головки рельса и 4...12 м по удалению от оси пути. Интенсивность динамических процессов имеет экспоненциальную зависимость, резко возрастающую в направлении к поверхности состава, и возрастает кратно (4,3) при увеличении скорости до 400 км/ч.

Таблица 2.6 – Скорость потока воздушной среды в эшелоне в вертикальной плоскости

№ эшелона воздушного потока	H, м	L, м	Средняя скорость потока в эшелоне, м/с	Динамическая составляющая, кг/м ²
Скорость движения 200 км/ч				
1	4,35	3	37	82,1
2	5	5	24	34,5
3	7	8	12	8,6
4	8	50	6	2,1
Скорость движения 400 км/ч				
1	4,25	5	74	328,5
2	4,5	8	49	144,0
3	6,3	12	24	34,5
4	8	100	12	8,6

Таблица 2.7 – Распределение средней скорости потока в эшелоне (цвет синий), и величины динамической составляющей (цвет красный) по высоте состава, и по удалению от оси состава.



Распределение средней скорости потока в эшелоне (цвет синий), и величины динамической составляющей (цвет красный) по высоте состава

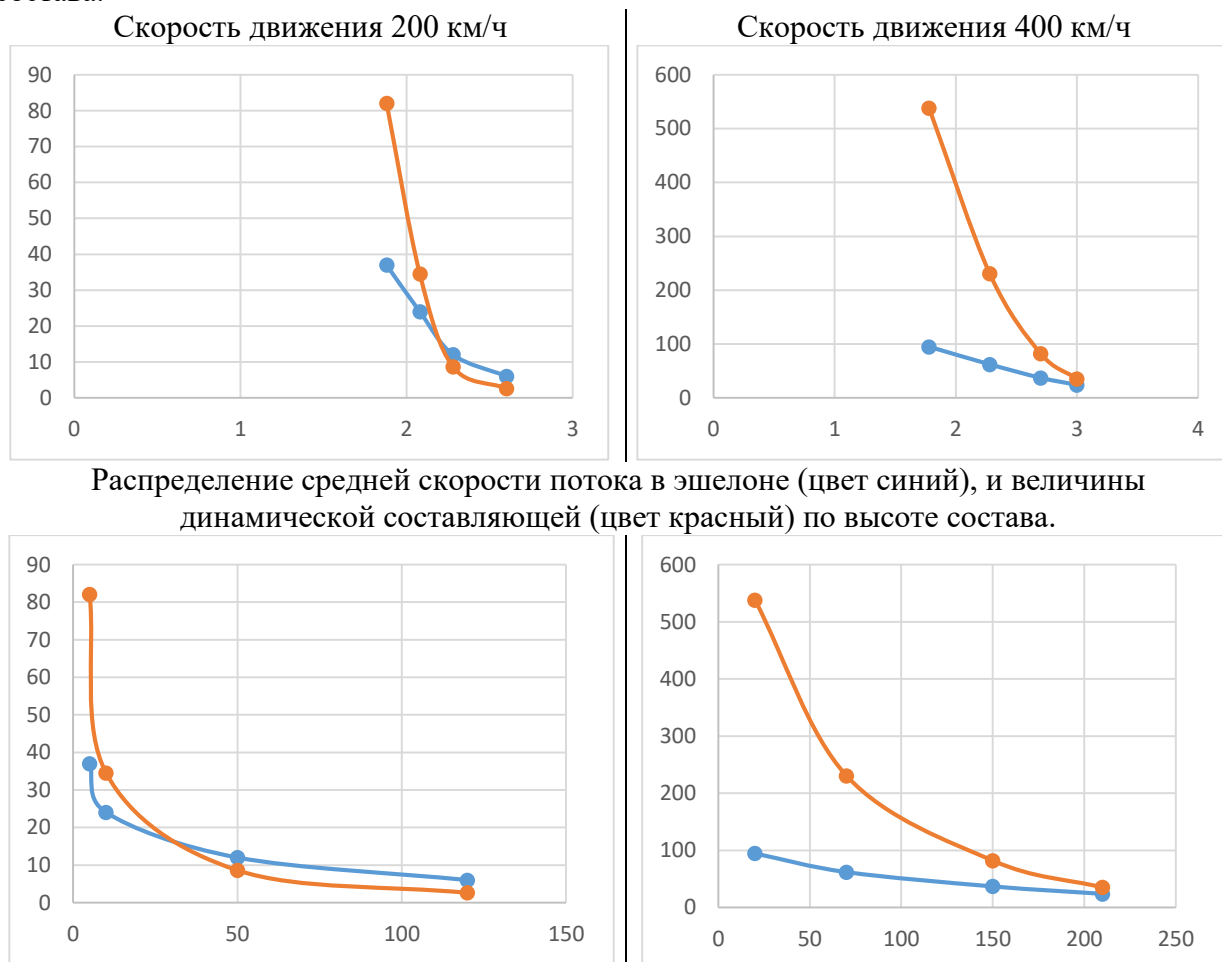
Распределение средней скорости потока в эшелоне (цвет синий), и величины динамической составляющей (цвет красный) по удалению от оси состава

Скорость потока воздушной среды в эшелоне в *горизонтальной плоскости*, а также распределение средней скорости потока в эшелоне представлены в таблицах 2.8 и 2.9 соответственно.

Таблица 2.8 – Скорость потока воздушной среды в эшелоне в вертикальной плоскости

№ эшелона воздушного потока	H, м	L, м	Средняя скорость потока в эшелоне, м/с	Динамическая составляющая, кг/м ²
Скорость движения 200 км/ч				
1	1,88	5	37	82,1
2	2,08	10	24	34,5
3	2,28	50	12	8,6
4	2,60	120	6	2,6
Скорость движения 400 км/ч				
1	1,78	20	94,6	538
2	2,28	70	62	230,6
3	2,7	150	37	82,1
4	3,0	210	24	35,23

Таблица 2.9 – Распределение средней скорости потока в эшелоне (цвет синий), и величины динамической составляющей (цвет красный) по высоте состава, и по длине состава.



Распределение средней скорости потока в эшелоне (цвет синий), и величины динамической составляющей (цвет красный) по высоте состава.

Распределение средней скорости потока в эшелоне (цвет синий), и величины динамической составляющей (цвет красный) по удалению от оси состава.

В результате исследования установлено, что на скоростях 200 и 400 км/ч по длине состава турбулентные явления возмущенной среды ускоренно развиваются в районе обтекателя состава и далее – линейно возрастают: на скоростях 200 – в пределах 0 ... 50 м; на скоростях 400 – в пределах 0 ... 200 м. Интенсивность динамических процессов имеет экспоненциальную зависимость, линейно возрастающую в направлении к хвосту состава, и возрастает кратно (5,7) при увеличении скорости до 400 км/ч.

С целью применения методики для поездов любых типов, данные, полученные в расчетах с использованием поезда «Сапсан» (Velaro Rus) делились на коэффициент $K_{\pi} = 0,6$, по аналогии с указаниями в ЕВРОКОД-1 [58].

2.5. Расчётные схемы и принятые допущения

При моделировании приняты следующие допущения и упрощения:

1. С целью снижения размерности задачи в моделях редуцирован ряд конструктивных элементов, не оказывающих существенного влияния на аэродинамические свойства объекта.

2. Нестационарный характер движения циркуляционных потоков учитывается через коэффициент трения воздушной среды, и определяется как касательная сила трения, отнесенная к единице поверхности раздела слоев воздуха.

3. Вся расчетная область имеет постоянную температуру.

4. Конвекционные процессы и влияние гравитации оказывают пренебрежимо малое влияние.

5. Перемещения надрессорного строения высокоскоростного поезда под действием бокового ветра значительно превосходят перемещения эстакады и ее опор под действием ветровых и поездных нагрузок, что позволяет считать кузова вагонов, тележки, элементы пролетные строения эстакады и опоры недеформируемыми телами.

6. Колёсные пары находятся в постоянном контакте с рельсами.

7. Рессорное подвешивание считается безынерционным ввиду малости масс.

8. Направление бокового ветра строго перпендикулярно направлению движения поезда.

2.6. Методика определения характеристик ветровой нагрузки

Для моделирования порывистого бокового ветра применяется методика, изложенная в [57]. Трасса проходит в двух зонах IV и V по скорости ветра. По давлению ветра I, II зоны, что соответствует – 30,59 кг/м² [57]. Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на 1 м² наветренной поверхности состава равно:

$$W_m = W_o + K_1 + C_x = 48,09 \text{ кг/м}^2$$

где: $W_o = 30,59$ – нормативное давление ветра для зоны II [57];

$K_1 = 1,31$ – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте местности А [57];

$C_x = 0,2$ – аэродинамический коэффициент [57].

Нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки на высоте z следует определять [57]:

$$W_p = W_m + K_s + N_u = 19,33 \text{ кг/м}^2;$$

где: $K_s = 0,67$ – коэффициент пульсаций давления ветра на уровне Z , [57];

$N_u = 0,6$ – коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра [57].

Пиковая положительная ветровая нагрузка [57]:

$$W_z = S \cdot (W_m + W_p) = 67,42 \text{ кг/м}^2 \text{ (0,66 кПа)};$$

где: $S = 1 \text{ м}^2$ – площадь.

Аэродинамическое воздействие на корпусные элементы поезда формирует пространственно направленный суммарный вектор движения воздушных масс относительно подвижного состава (рис. 2.11): в горизонтальной (угол рыскания) и вертикальной плоскостях (угол тангажа).

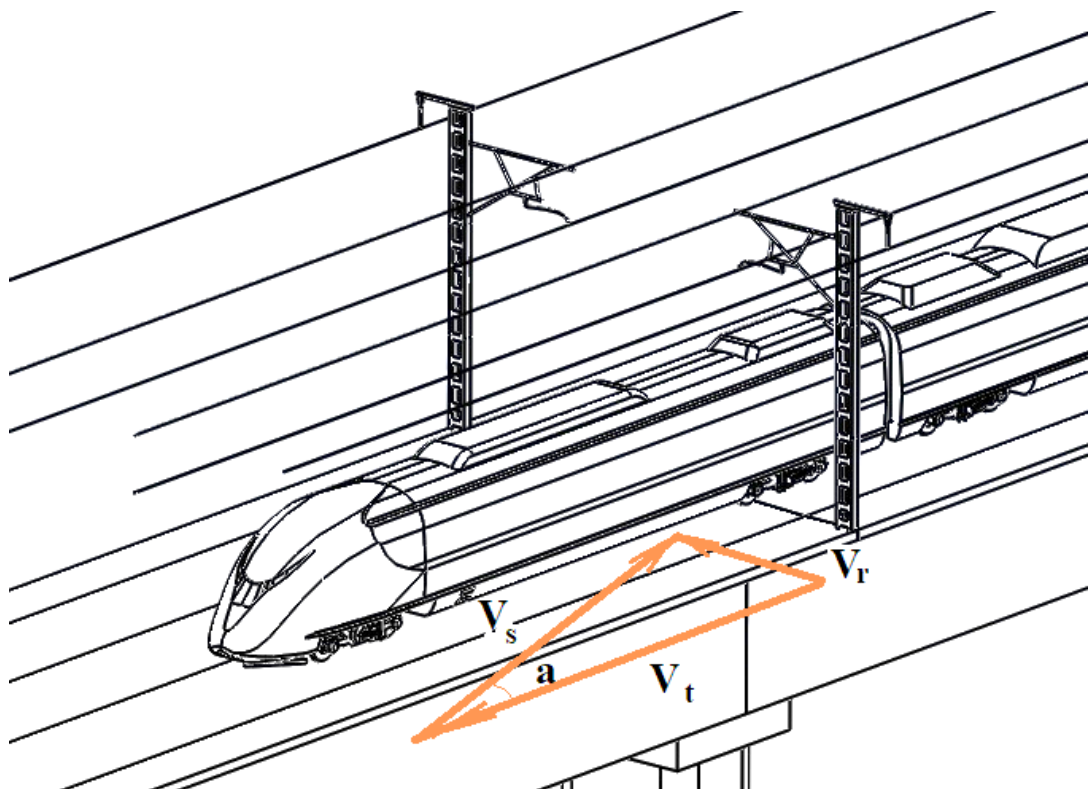


Рисунок 2.11 – Схема движения воздушных масс относительно подвижного состава

Для движения поезда с постоянной скоростью и принятой модели устойчивого бокового ветра [60] суммарный вектор аэродинамического воздействия на корпус подвижного состава определяется по формуле:

$$V_s = \sqrt{V_t^2 + V_r^2}, \quad (2.2)$$

где: V_t – скорость транспортного средства, (м/с); V_r – скорость бокового воздушного потока, (м/с).

Угол рыскания: $\tan a = \frac{V_r}{V_t} \quad (2.3)$

Установившиеся аэродинамические силы (F) и моменты (M) определяются следующим образом:

$$F = 0,5\rho S C_F(a) V_r^2 \quad (2.4)$$

$$M = 0,5\rho S h C_M(a) V_r^2 \quad (2.5)$$

где: F – аэродинамическая сила, (Н),

M – аэродинамический момент, (Н/м),

C_F – коэффициент аэродинамической силы,

C_M – коэффициент аэродинамического момента,

ρ – плотность воздуха, (кг/м³),

S – контрольная площадь, (м²),

h – контрольная высота, (м).

Определение боковой ветровой нагрузки выполняется с помощью программы, разработанной на табличном процессоре Microsoft Excel.

2.7 Алгоритм расчета аэродинамического давления на объекты транспортной инфраструктуры

Для определения величины аэродинамического давления на поверхность объекта, необходимо:

1. Определить величины статических давлений $P_{ст}$ для плоских поверхностей, расположенных параллельно оси пути. Промежуточные значения рассчитывать по интерполяции.
2. С целью получения величин для конкретной модели табличные значения следует умножать на коэффициент аэродинамики конкретного подвиж-

ного состава $K_{\text{поезд}}$. Так, например, для поезда «Сапсан» (Velaro Rus), эксплуатируемого в РФ, табличные значения необходимо умножить на коэффициент $K_{\text{поезд}} = 0,6$. Получим величину:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{стп}} \cdot K_{\text{поезд}} [57].$$

3. Из таблиц 2.6-2.9 с учетом длины, ширины или высоты, на которой расположен объект, выбрать значения скорости потока V м/с для соответствующего эшелона (дистанции удаления от оси пути, или расстояния от уровня верха головки рельса).

4. По формуле (2.1) вычислить динамическое давление P_d для поверхностей, расположенных перпендикулярно оси пути. Для расчета можно использовать интерактивную таблицу EXCEL.

5. Учет аэродинамического сопротивления криволинейных, решетчатых и других поверхностей производится умножением P_d на значения соответствующих аэродинамических коэффициентов C указанных в [57], Приложение Д.1 [1]. Получим $P_{dc} = P_d \cdot C$.

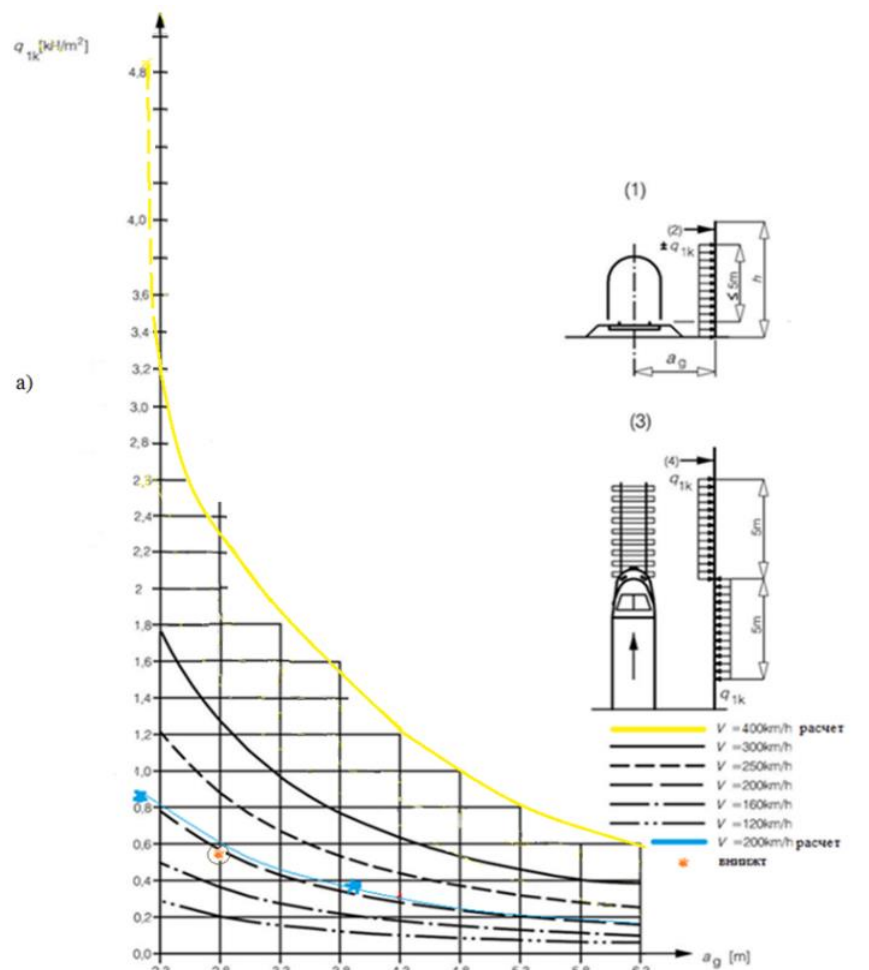
6. Для наклонных поверхностей или расположенных под углом к оси пути $P_{дса} = P_{dc} \cdot \cos \alpha$

7. Полное давление $P_{\text{п}} = P_{\text{стп}} \cdot P_{дса}$

2.8. Верификация аэродинамической модели высокоскоростного подвижного состава

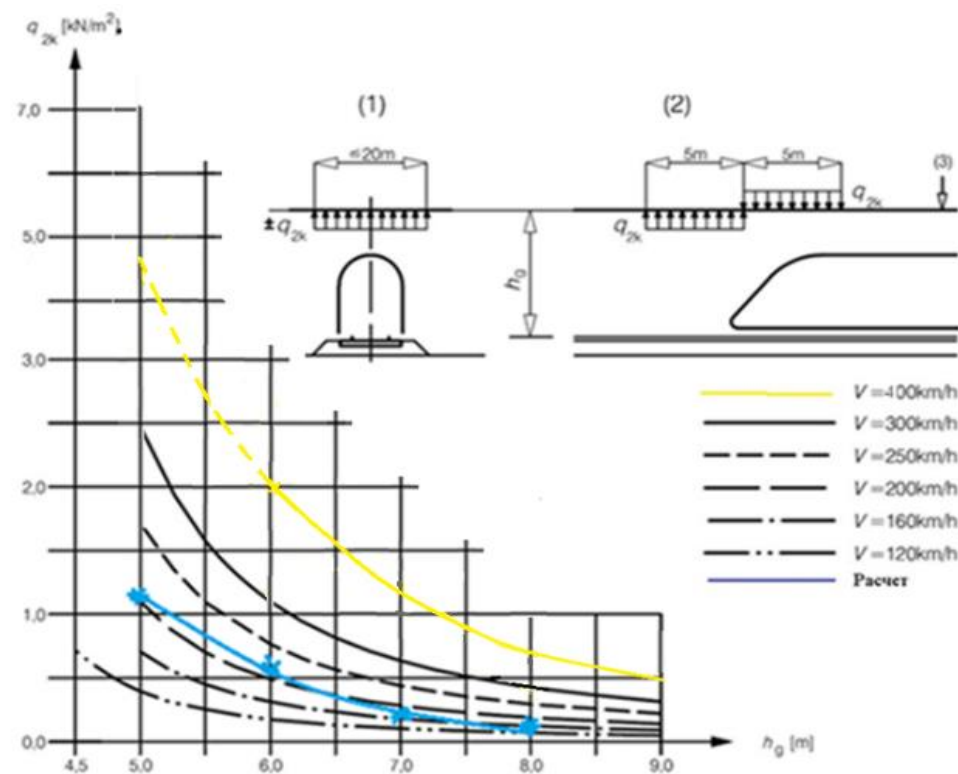
Применение в исследованиях математической модели требует подтверждения ее адекватности реальному объекту. При отсутствии данных измерения на реальном поезде, результаты моделирования аэродинамического воздействия сопоставлялись с данными, приведенными в ЕВРОКОД-1 [42-44, 61, 62] (рис. 2.12).

Принято допущение, если результаты моделирования показали удовлетворительную сходимость, то можно считать, что модель адекватна реальному объекту.



(1) - сечение; (2) - поверхность конструкции; (3) - вид сверху; (4) - поверхность

а)



(1) - сечение; (2) - вертикальная проекция; (3) - обратная сторона конструкции

б)

Рисунок 2.12 – Сопоставление зависимостей распространения аэродинамического давления по горизонтали и вертикали, по данным ЕВРОКОД-1 и данным моделирования при скорости движения поезда 200 км/ч: а – сбоку; б – сверху (проверочный режим показан звездочкой)

Таблица 2.10 – Распределение давления среды в вертикальной плоскости при удалении крышевой поверхности вагона

Расстояние от оси пути	Скорость	Плотность	Статическое давление	Давление скоростного напора	Общее давление	Превышение атмосферного давления	С учетом уменьшающего коэффициента (0,6)	ЕВРО-КОД	Расчет
2,3	70,7	1,17	100600	2981	103581	2256	3,76	2,3	3,2
3	54	1,18	101000	1754	102754	1429	2,38	3,3	2,4
3,3							1,70		1,8
4	40,2	1,18	101140	972	102112	787	1,31	4,3	1,45
4,3							1,02		1,2
5	33	1,18	101180	655	101835	510	0,85	5,3	0,97
5,3							0,75		0,8
6	29	1,19	101236	510	101746	421	0,70	6,3	0,69
6,3									0,6

Таблица 2.11 – Однофакторный дисперсионный анализ

Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия		
2,3	4	19,2	4,8	1,666667		
3,2	4	5,51	1,3775	0,563158		
Дисперсионный анализ						
Источник вариации	S _s	d _f	M _s	F	P-Значение	F критическое
Между группами	23,42701	1	23,42701	21,01242	0,003754947	5,987377607
Внутри групп	6,689475	6	1,114913			
Итого	30,11649	7				

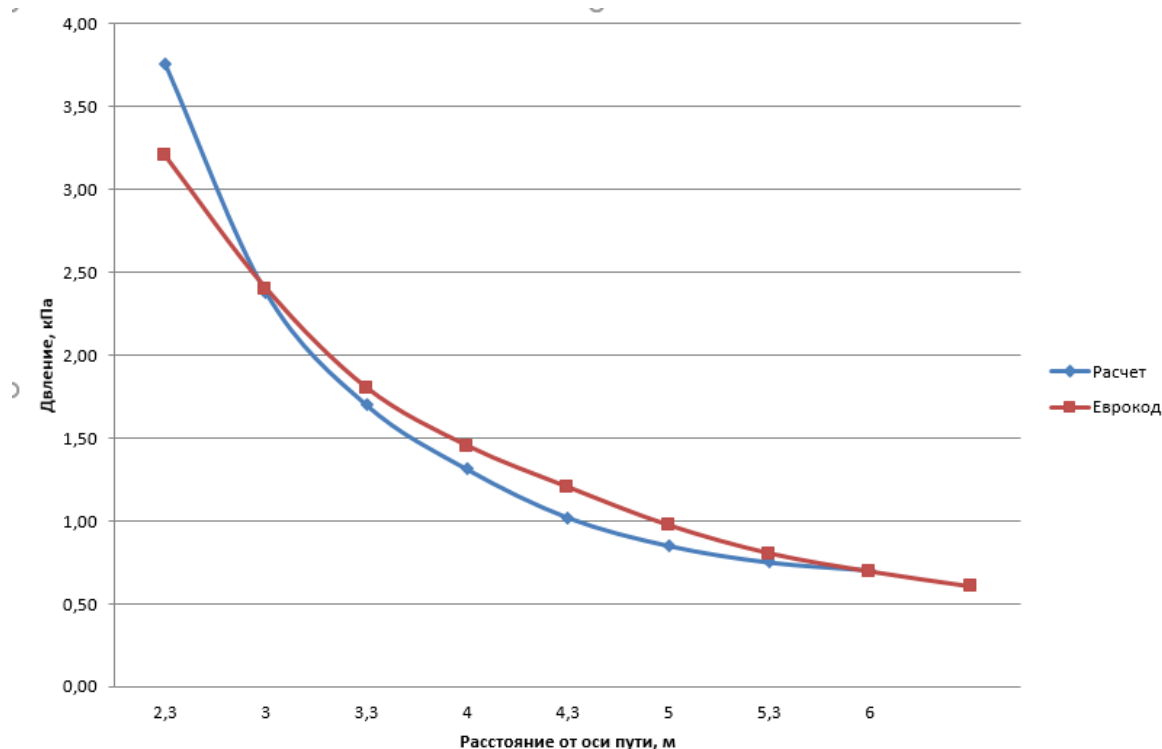


Рисунок 2.13 – Сравнение результатов распределения давления среды в вертикальной плоскости при удалении от крышевой поверхности вагона, полученных по методике ЕВРОКОД и в процессе моделирования

В таблице 2.10 приведен расчет распределения давления среды в вертикальной плоскости при удалении крышевой поверхности вагона.

Отклонения полученных расчетных данных в большую сторону на расстоянии 7-9 м от верха состава порядка 0,6 кПа, что составляет 13 % от максимума, который принимается в расчетах объектов инфраструктуры (рис. 2.13). В таблице 2.11 представлен однофакторный дисперсионный анализ распределения давления среды в вертикальной плоскости при удалении от крышевой поверхности вагона, полученных по методике ЕВРОКОД и в процессе моделирования.

Результаты анализа показывают, что разница в результатах, полученных по методике ЕВРОКОД и в процессе моделирования, является значимой (существенной). Об этом свидетельствует значение $F_{\text{расч}}: 21,01242 > F_{\text{критич}}: 5,987377607$, а также малое значение достигнутого уровня значимости (p – значение = 0,0037). Следовательно, нулевая гипотеза отклоняется и принимается альтернативная о том, что результаты расчета по

методике ЕВРОКОД и полученные в результате моделирования подобны, причем наблюдается прямая зависимость (уровень корреляции 0,96), т.е. более высокому уровню значений по методике ЕВРОКОД соответствуют более высокие значения, по результатам моделирования.

2.9 Алгоритм численного моделирования динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с возмущенной воздушной средой и объектов транспортной инфраструктуры

В соответствии с аэродинамической теорией значение скоростного напора ветрового потока прямо пропорционально квадрату его скорости. Следовательно, влияние ветрового потока, формируемого движущимся высокоскоростным поездом, становится соизмеримым с воздействием на объекты путевой инфраструктуры ураганного ветра и даже превышающим его. Одними из наиболее подверженных аэродинамическому воздействию объектов инфраструктуры являются ферменные пролетные строения железнодорожных мостов, характеризующиеся замкнутой перфорированной структурой, а также непосредственной близостью к движущемуся поезду. Если рассматривать промежуточные вагоны, то величина дополнительного ветрового воздействия не способна привести к опрокидыванию движущегося состава. Для головного вагона при схождении областей давлений головной воздушной волны и давлений, связанных с внешним ветровым воздействием, величина опрокидывающей силы и момента может привести к опрокидыванию головного вагона высокоскоростного поезда.

В Техническом регламенте «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» (ТР ТС 002/2011) [58] указаны требования к уменьшению влияния бокового ветрового воздействия на высокоскоростной железнодорожный подвижной состав. В статье 83 подпункт у) показано, что: «на участках сильных боковых ветров, которые могут привести к опрокидыванию и сходу с рельсов высокоскоростного железнодорожного подвижного состава, должны быть предусмотрены мероприятия по ограничению воздействия таких

ветров на высокоскоростной железнодорожный подвижной состав, движущийся с установленной максимальной скоростью».

Алгоритмические решения численного моделирования динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с возмущенной воздушной средой и объектов путевой инфраструктуры проводилось в трехмерной постановке с помощью модуля Flow Simulation программного пакета SolidWorks, с помощью метода конечных объемов и метода «Frozen Rotor».

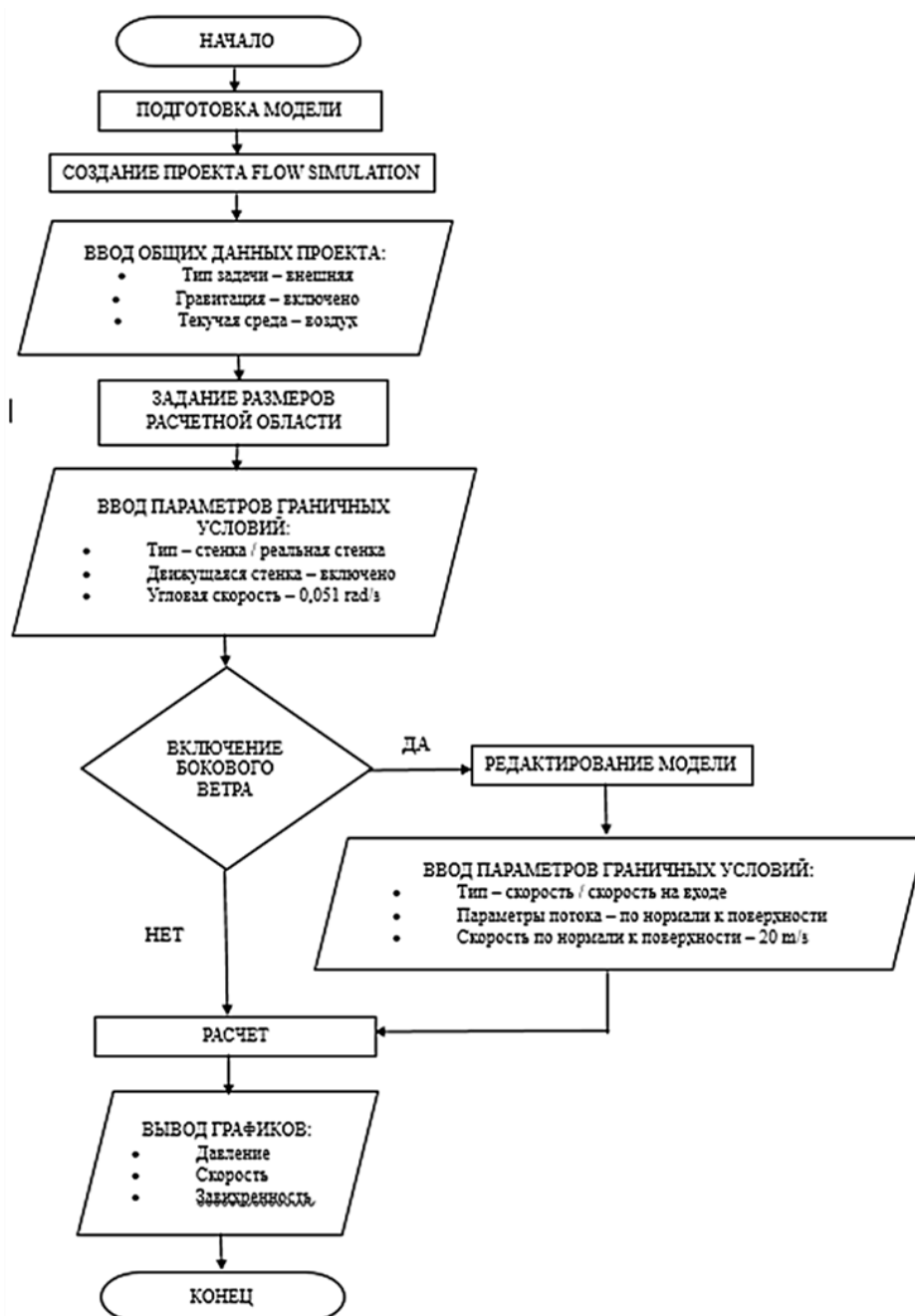


Рисунок 2.14 – Алгоритм применения метода «Frozen Rotor» (замороженный ротор)

Алгоритм «Frozen Rotor» (рис. 2.14) реализует подход, при котором движущийся по определенному радиусу состав фиксируется в определённом положении, а воздушная среда перемещается, оmyвая его контуры. Преимуществом данного метода является то, что он позволяет без потери точности существенно сократить время и ресурсы процесса расчета.

В данном исследовании в качестве подвижного объекта выступает состав (ротор), а неподвижным являются сопряженные между собой мостовые фермы (статор). Радиус окружности, по которой происходит движение состава, необходимо задавать достаточно большим для снижения погрешности расчета, связанного с наличием тангенциальной составляющей скорости.

Подготовка модели для расчета по методике «Frozen Rotor» заключается в следующем:

1. Создание оси вращения вокруг которой на расстоянии (по радиусу) 490 метров будет вращаться состав.
2. Кратное масштабирование объектов с целью реализации геометрии сцены в пределах расчетной области SolidWorks – $1000 \cdot 1000$ м.
3. Осуществление применения граничных условий в виде воздействия ветровой нагрузки в направлении перпендикулярном оси пути.

Для подготовки численного эксперимента использовалась твердотельная модель высокоскоростного электропоезда «Сапсан» (Velaro Rus), вращающаяся вокруг системы координат на расстоянии (по радиусу) 490 метров с угловой скоростью $\omega = 0,051 \text{ rad/s}$.

Численное моделирование выполнялось при пяти разных положениях состава электропоезда на мостовых фермах. Первое положение соответствовало заходу головного вагона на мостовые фермы, второе положение – заходу состава на первую ферму целиком, третье положение – нахождению всего состава на двух фермах, четвертое положение – прохождению составом первой фермы и нахождению хвостовой части состава на второй ферме и пятое положение – нахождению хвостового вагона на второй ферме.

На следующем этапе численного моделирования в проект добавляются новые граничные условия со следующими параметрами: тип – скорость бокового ветра на входе, параметры потока – по нормали к поверхности, скорость по нормали к поверхности – 20 м/с.

Численное моделирование выполнялось при пяти разных положениях состава электропоезда относительно мостовых ферм.

2.10. Результаты численного моделирования динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с возмущенной воздушной средой при движении на эстакаде

С целью построения полей скоростей и давлений, окружающих поезд воздушных масс в зависимости от его положения применен метод «Frozen Rotor» (замороженного ротора) [2, 3, 43]. Расчет выполнен в квазистационарном режиме. Смоделировано воздействие 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.

Выявлено, что наличие свободного пространства под пролетным строением эстакады формирует особую конфигурацию аэродинамической тени, создаваемой корпусом подвижного состава и эстакады. В частности, с наветренной стороны воздушный поток разделяется на две части: верхняя часть омывает крышевую и боковую поверхности корпуса, здесь преобладают зоны высоких скоростей, что способствует образованию области отрицательного давления; вторая – направлена в зону свободного пространства под пролетным строением эстакады (рис. 2.15). Нижняя часть боковой поверхности корпуса вагона и подвагонное пространство находятся в зоне резкой смены направления разделяющихся потоков воздушных масс, что вызывает снижение скорости и рост давления среды. При движении транспортного средства, например, по высокой насыпи, подвагонная область подвижного состава подвержена интенсивному воздействию ускоренно перемещающихся воздушных масс.

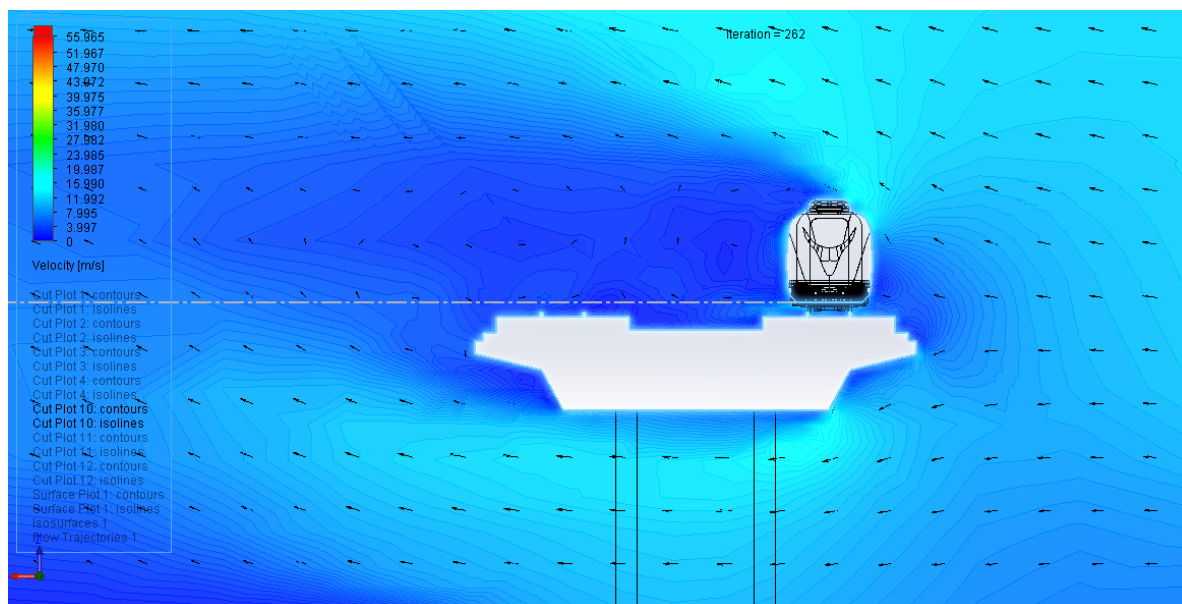
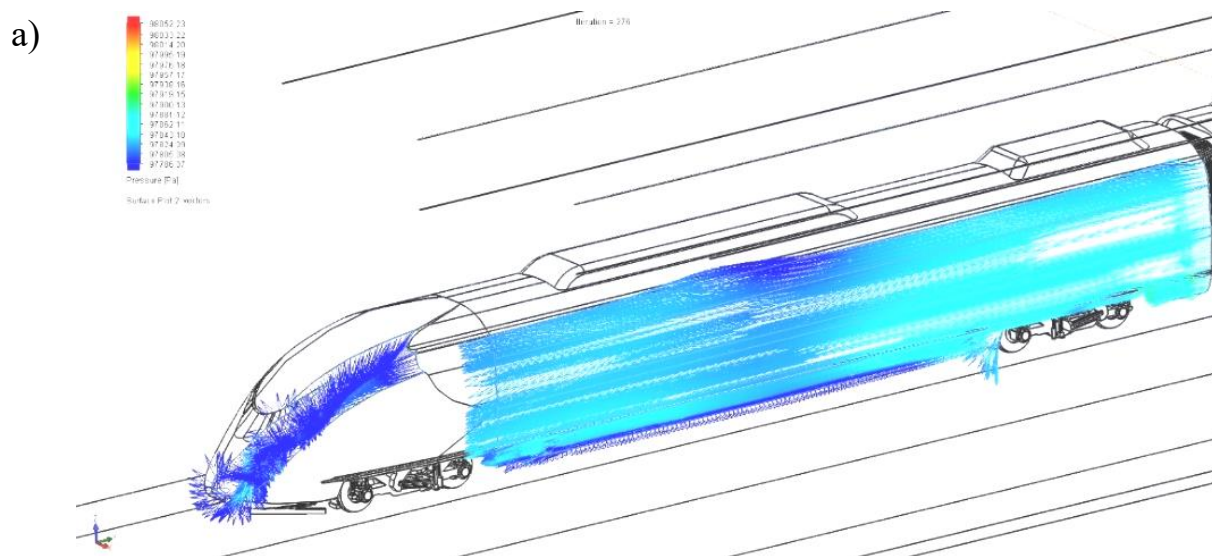


Рисунок 2.15 – Эпюра распределения поля скоростей в поперечном направлении: скорость поезда – 200 км/ч, скорость бокового ветра 12 м/с

Проведенные расчеты показали, что процесс омыwania кузова вагона результирующим потоком воздушных масс создает на его поверхности характерную структуру срывных вихрей сложной конфигурации, представленную на рисунке 2.16 векторами направлений движения воздушных масс. При этом обнаружена явно выраженная устойчивая тенденция к смещению участков вихреобразования, обусловленных действием потока бокового ветра, на радиусной части крышечной поверхности по ходу движения поезда по мере роста скорости движения. Увеличение скорости ветра приводит к интенсификации процесса вихреобразования.



б)

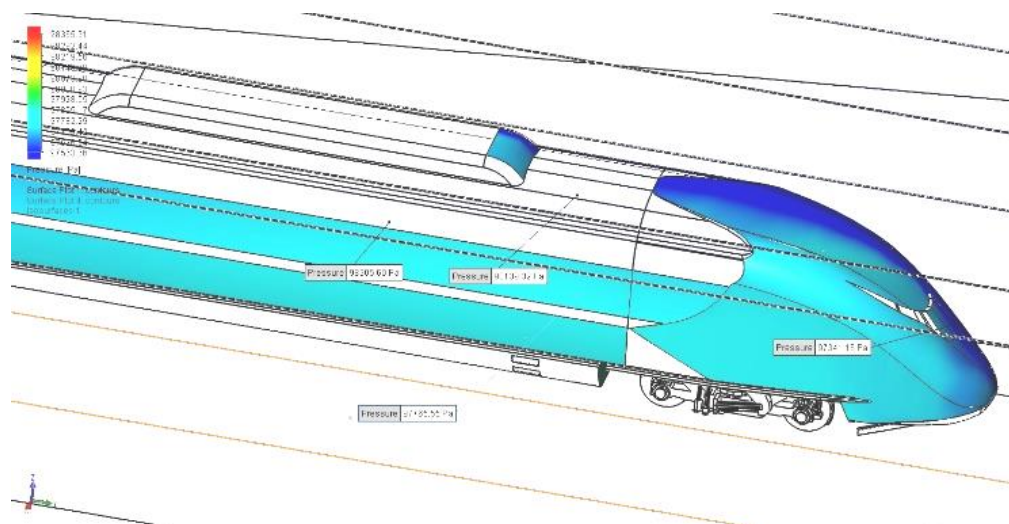
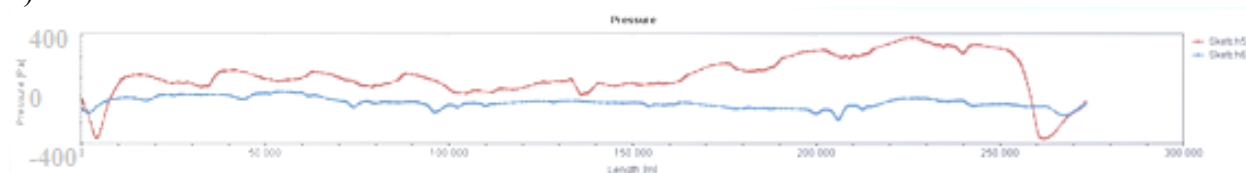
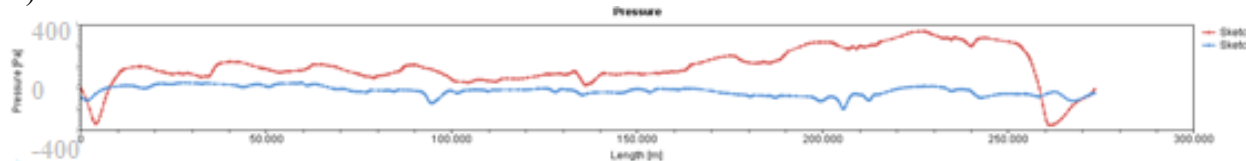


Рисунок 2.17 – Инерциальный снос результирующего потока воздушных масс вдоль поверхности корпуса вагона: а – превалирование действия бокового ветра при скоростях движения в пределах от 200 до 300 км/ч; б – снос эпицентра формирования срывных потоков в направлении хвостового вагона при скоростях движения более 300 км/ч и боковом ветре 32 м/с

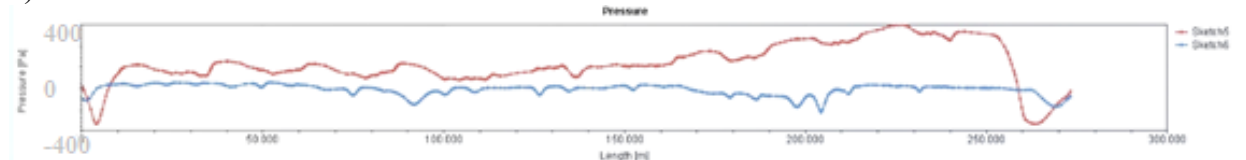
а)



б)



в)



г)

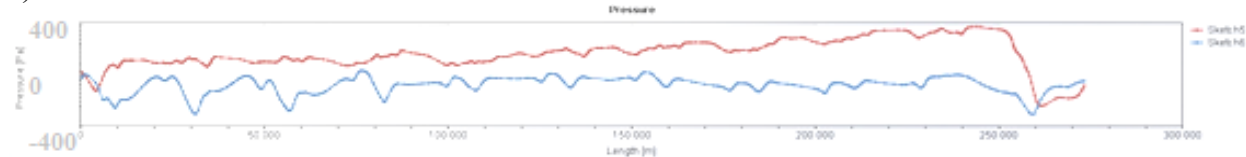


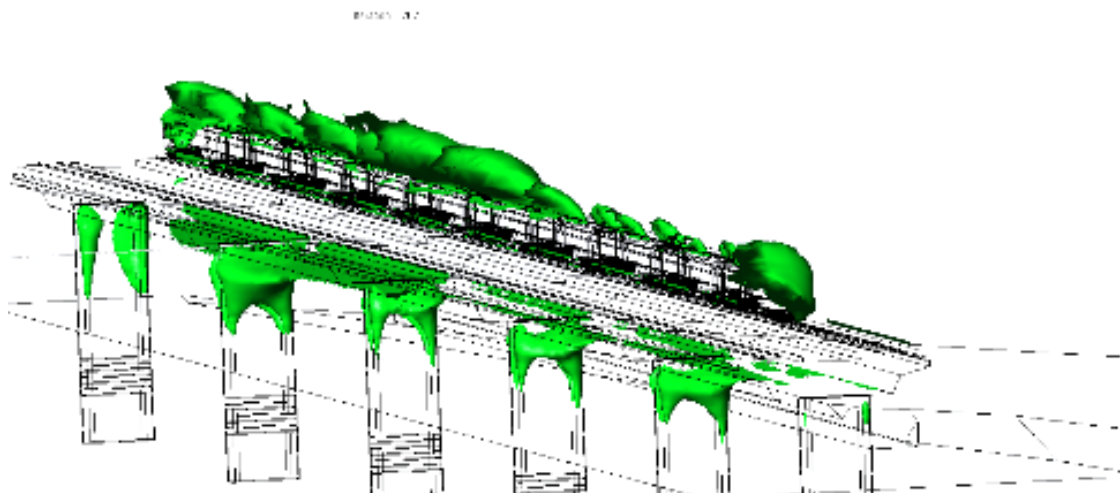
Рисунок 2.18 – Эпюра распределения давления воздушной среды на поверхности кузова состава: а – при скорости поезда 200 км/ч и боковом ветре 27 м/с (а), б – то же, но при скорости 300 км/ч; в – то же, но при скорости 400 км/ч; г – то же, но при скорости 400 км/ч и боковом ветре 12 м/с.

Синие линии – подветренная сторона, красные - наветренная

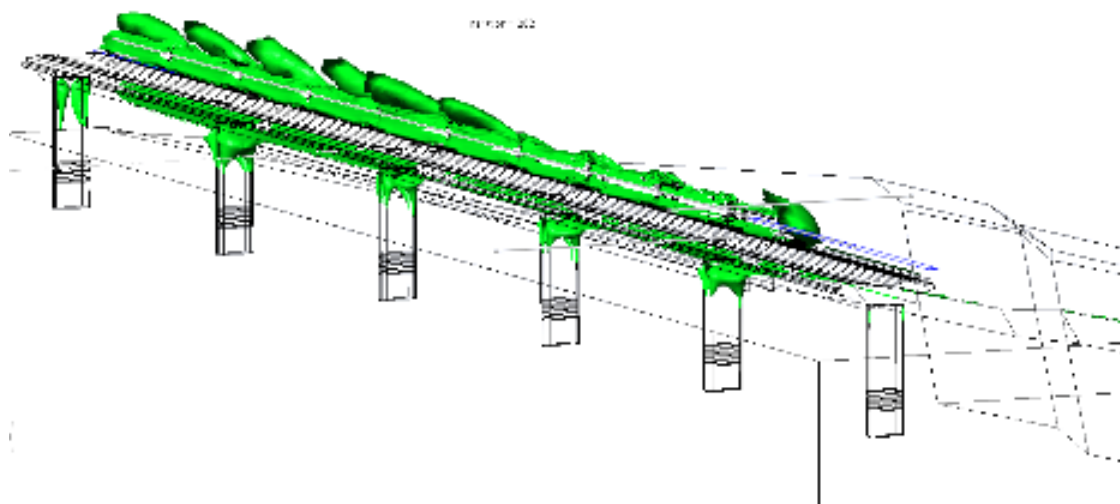
Расчет распределения давления по длине поезда был выполнен для различных скоростей движения поезда, а именно: 200, 300, и 400 км/ч при скорости бокового ветра 27 м/с. При скорости 400 км/ч был выполнен аналогичный

расчет при скорости ветра 12 м/с. Результаты вычислений представлены на рисунках 2.18 и 2.19.

а)



б)



в)

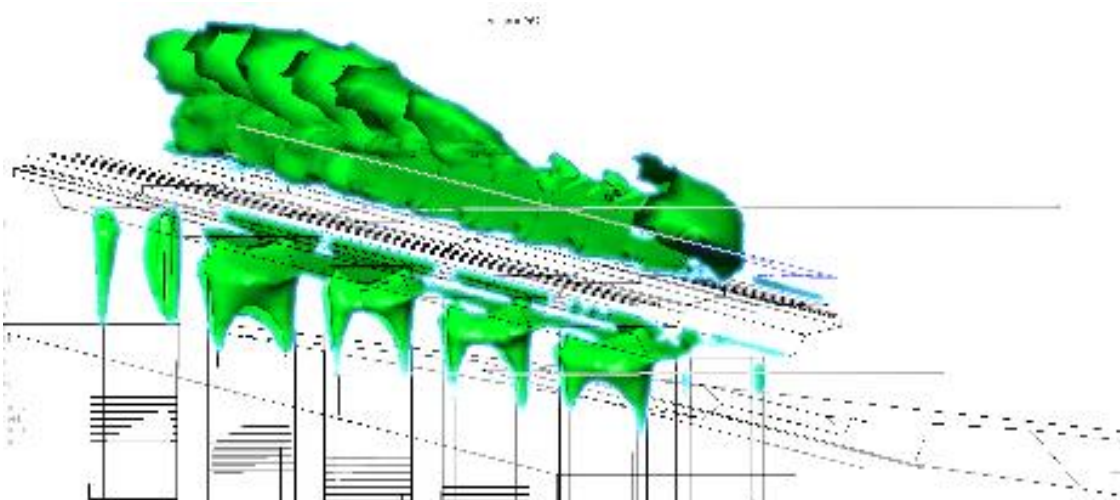


Рисунок 2.19 – Изоповерхности скоростей воздушных масс, рассчитанные вблизи движущегося подвижного состава, полученные при скорости бокового ветра 27 м/с и скорости поезда 200 км/ч (а), 300 км/ч (б), 400 км/ч (в)

Объемное представление изоповерхности воздушных масс вблизи движущегося подвижного состава, полученные при скорости бокового ветра 27 м/с и скорости поезда 200, 300, 400 км/ч представлены на рисунке 2.19.

Результаты исследования распределения давления воздушной среды вдоль состава высокоскоростного поезда показали, что при различных скоростях движения и воздействии бокового ветра картина остаётся схожей в диапазоне скоростей до 300 км/ч. Однако, при дальнейшем увеличении скорости возникают значительные колебания давления на подветренной стороне кузова, особенно в области первых нескольких вагонов состава. При этом максимальному воздействию со стороны возмущенной воздушной среды подвержены крайние вагоны состава (причем воздействие усиливается в направлении хвостового вагона). С увеличением скорости движения, неравномерность распределения нагрузок на поверхность подвижного состава усиливается. В таблице 2.12 представлены усредненные значения давления воздушной среды на поверхности кузова головного вагона с наветренной и подветренной сторон в зависимости от скоростей бокового ветра и скорости движения поезда.

Таблица 2.12 – Значения давления воздушных масс на боковую поверхность корпуса головного вагона с наветренной и подветренной сторон

Скорость поезда, км/ч	Сторона нагружения	Скорость бокового ветра, м/с		
		12	27	36
200	Наветренная, (Pa)	-6,2	35,1	62,7
200	подветренная, (Pa)	-128	-387	-653,6
300	наветренная, (Pa)	-26,9	110,9	123,5
300	подветренная, (Pa)	-191,2	-403,1	-650,5
400	наветренная, (Pa)	-103,1	138,5	248,1
400	подветренная, (Pa)	-319,7	-424	-669,1

Осциллограммы реакций в контактных группах «ходовые колеса – головка рельса» передней и задней тележек при скорости 12 м/с и 36 м/с представлены на рисунках 2.20 – 2.23 соответственно.

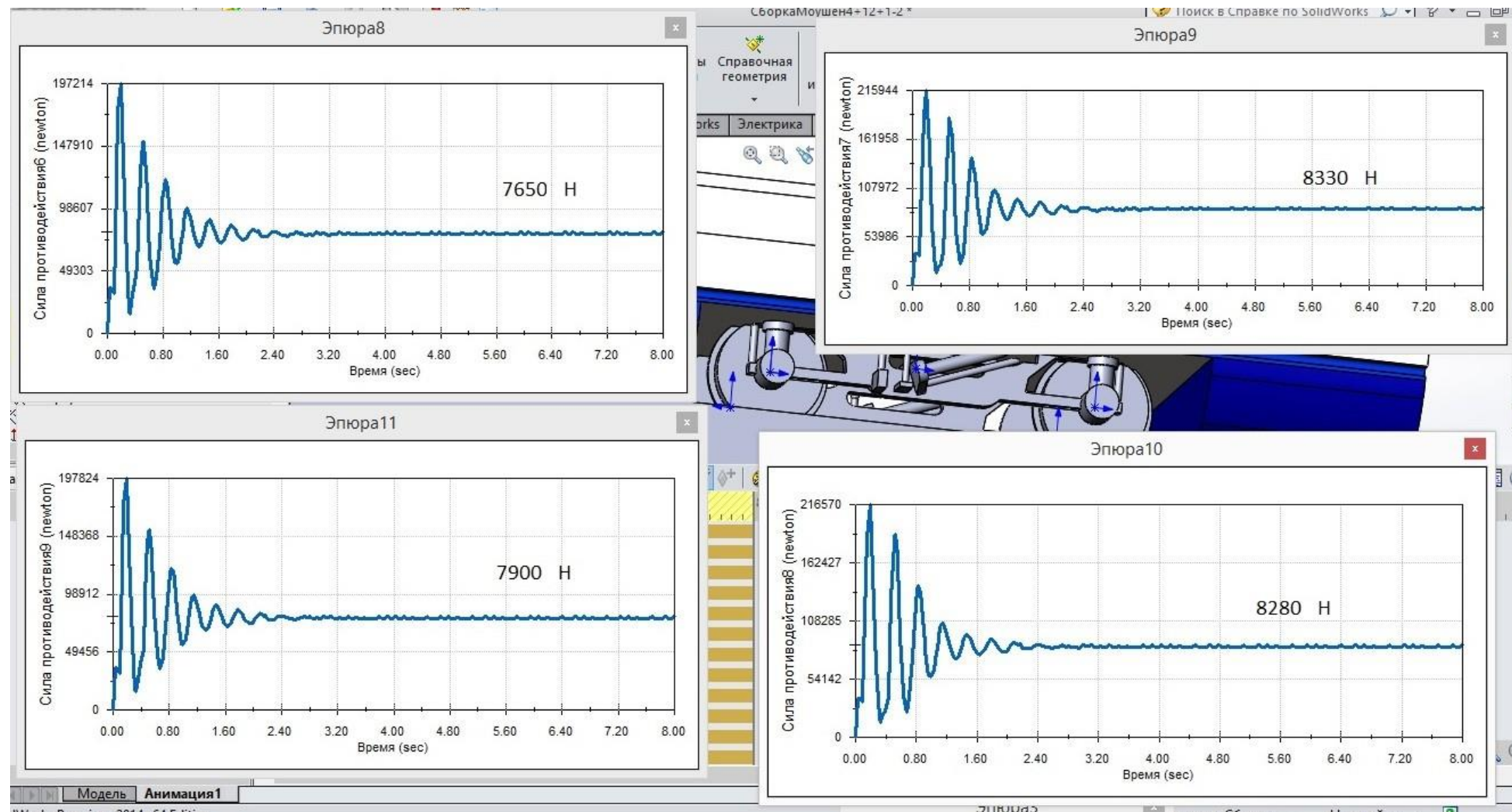


Рисунок 2.20 – Реакции в контактных группах «ходовые колеса – головка рельса» передней тележки при скорости воздушного потока 12 м/с

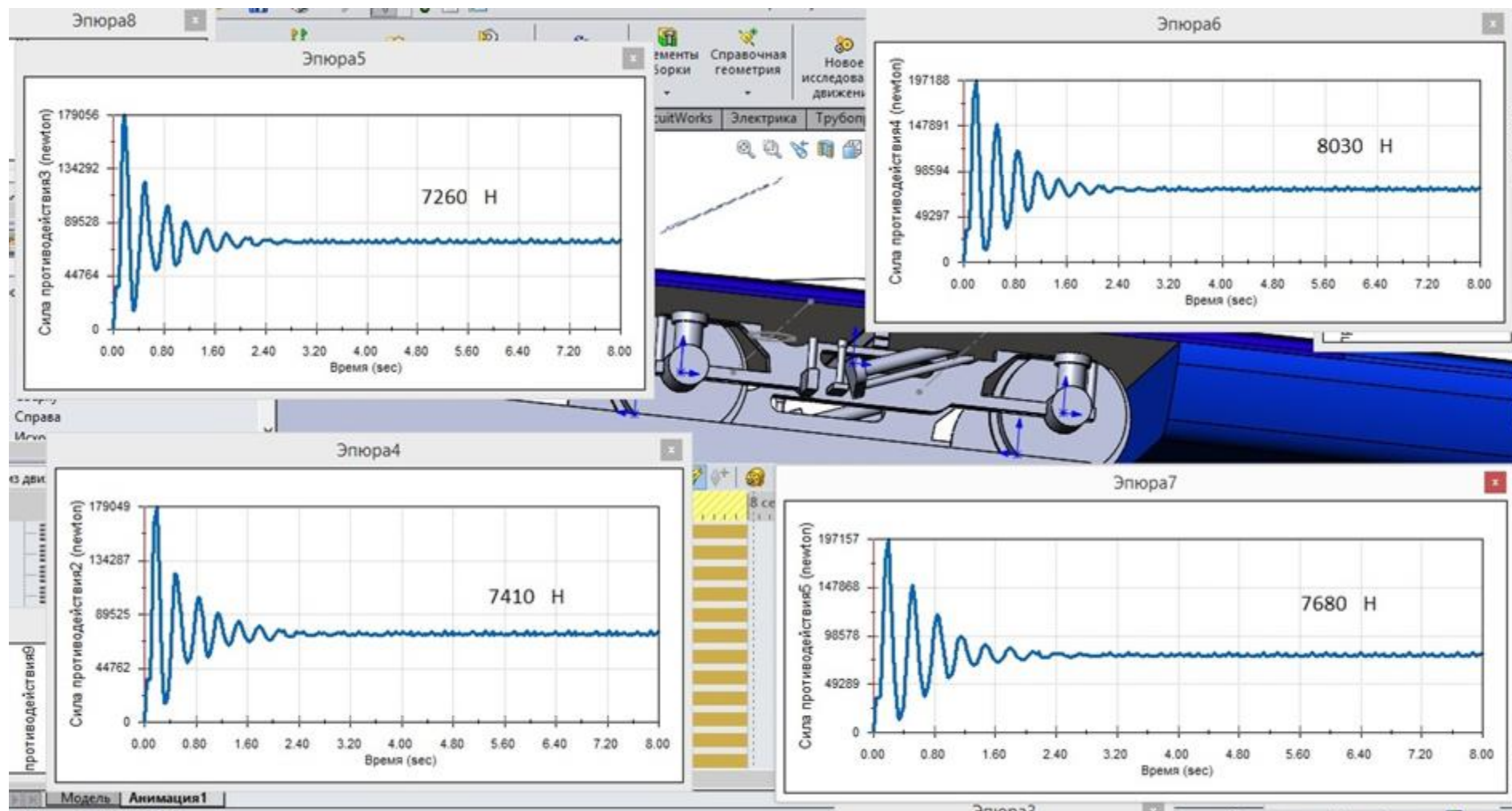


Рисунок 2.21 – Реакции в контактных группах «ходовые колеса – головка рельса» задней тележки при скорости воздушного потока 12 м/с

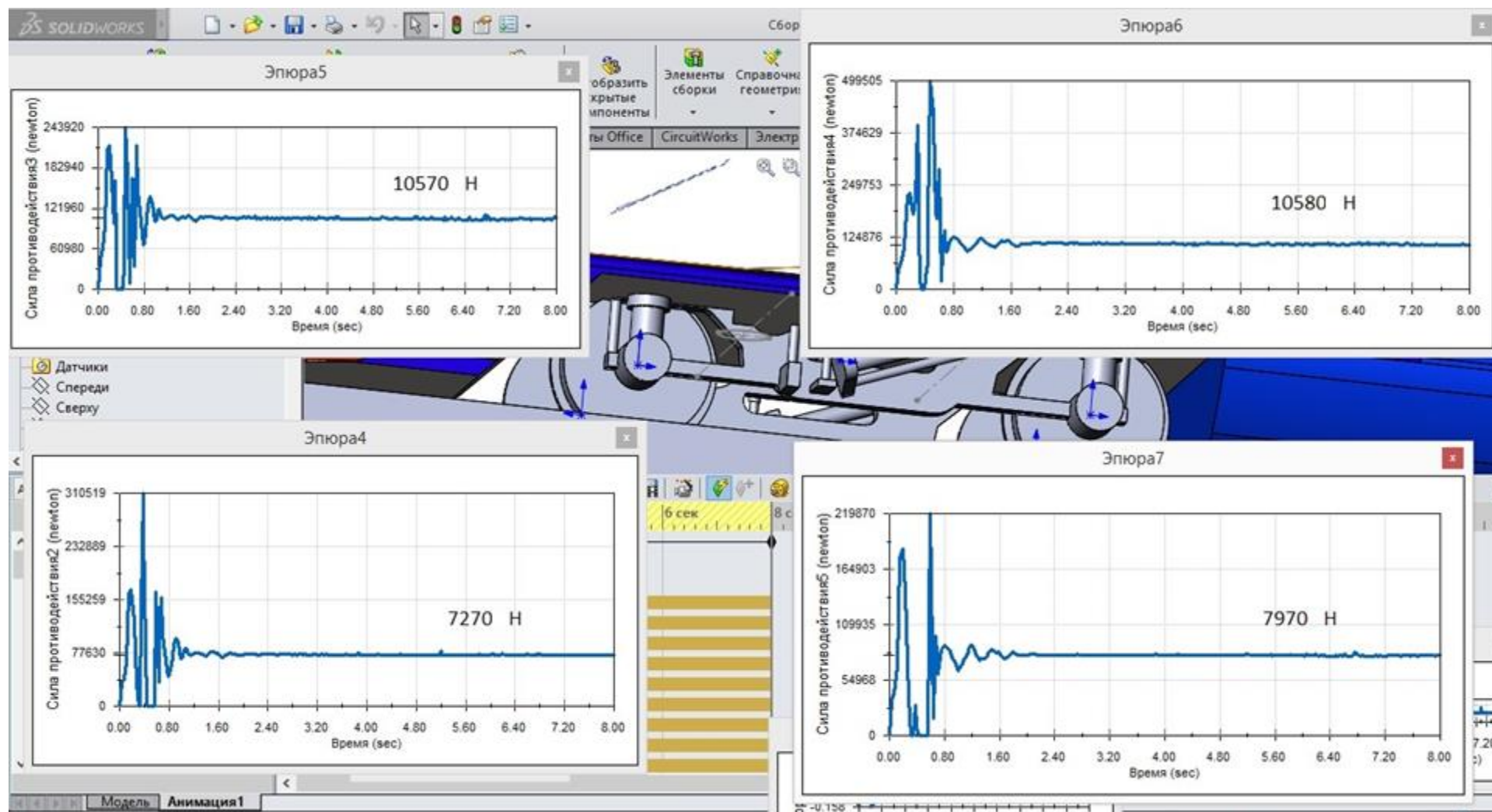


Рисунок 2.22 – Реакции в контактных группах «ходовые колеса – головка рельса» передней тележки при скорости бокового воздушного потока 36 м/с

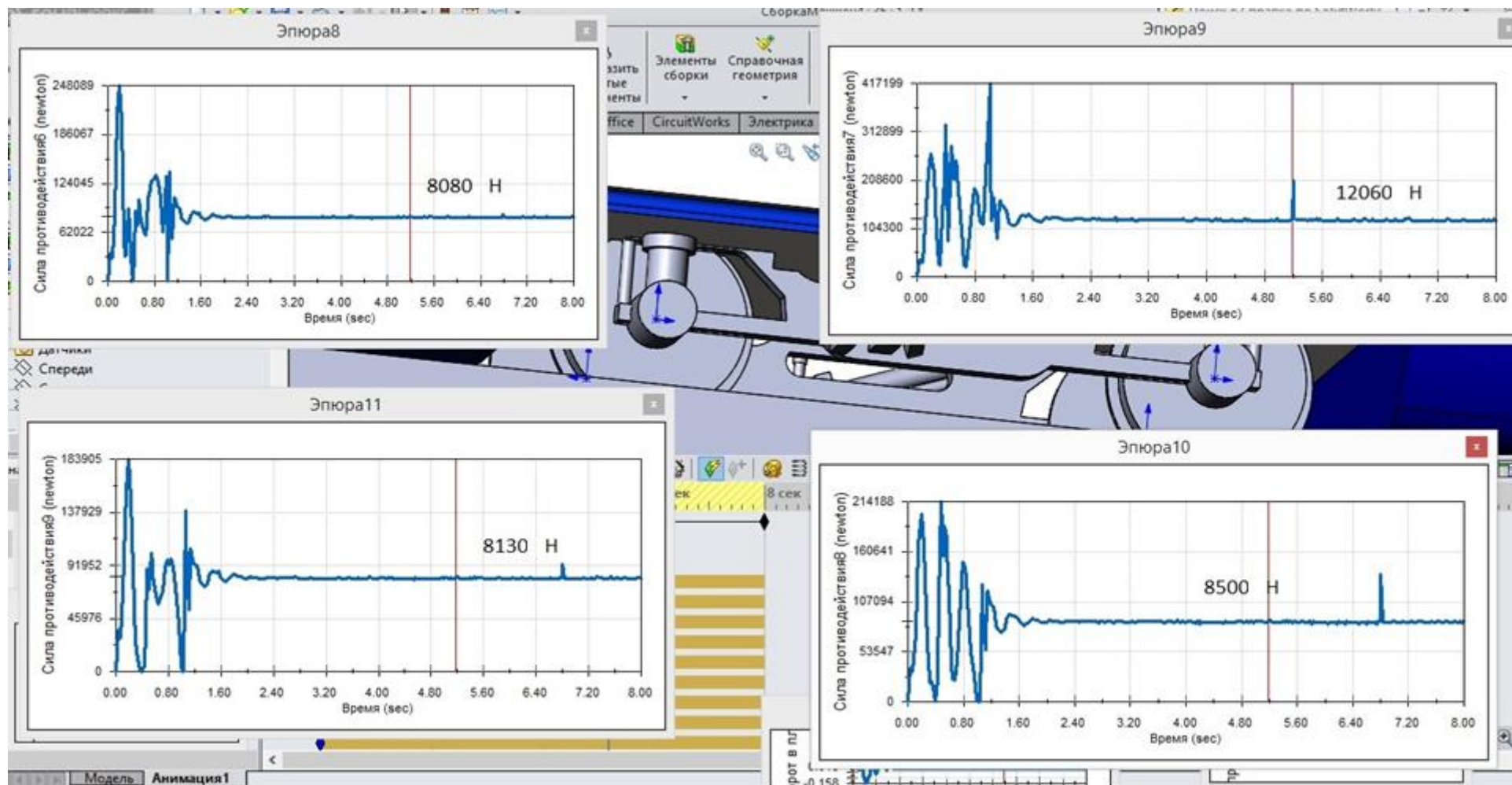


Рисунок 2.23 – Реакции в контактных группах «ходовые колеса – головка рельса» задней тележки при скорости бокового воздушного потока 36 м/с

Нагрузки на ходовые колеса при скоростях воздушного потока 12 м/с и 36 м/с соответственно представлены в таблице 2.13 [11, 12].

Таблица 2.13 – 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. 2.13) 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 [11, 12].

Результаты исследований показывают наличие определенной корреляции уровня турбулентности возмущенной воздушной среды в коридоре движения железнодорожного транспортного средства и реакций в контактных группах «ходовые колеса – головка рельса» передней и задней тележек. В пределах скоростного режима движения поезда 300 км/ч и боковом ветре не более 27 м/с колебательный процесс в контактных группах «ходовые колеса – головка рельса» имеет гармонический характер.

При увеличении скорости бокового ветра более 27 м/с и скоростном режиме движения поезда свыше 300 км/ч наблюдается постепенная смена режима колебательного процесса в контактных группах «колесо – рельс», в частности появляются признаки низкочастотной неустойчивости, что связано с резко возросшей турбулентностью формирующихся срывных потоков воздушной среды на кузове вагона.

Поскольку элементы многофюзеляжного объекта имеют упруго – податливые связи между собой, и значения поперечных нагрузок различны по длине состава, значение углового крена вагонов в районе хвоста поезда будет отличаться от остальных, что приведет к взаимовлиянию сопряженных элементов друг на друга, и усложнит колебательный процесс в контактных группах «колесо – рельс» [11, 12, 98-101] и, как следствие увеличит опасность схода подвижного состава.

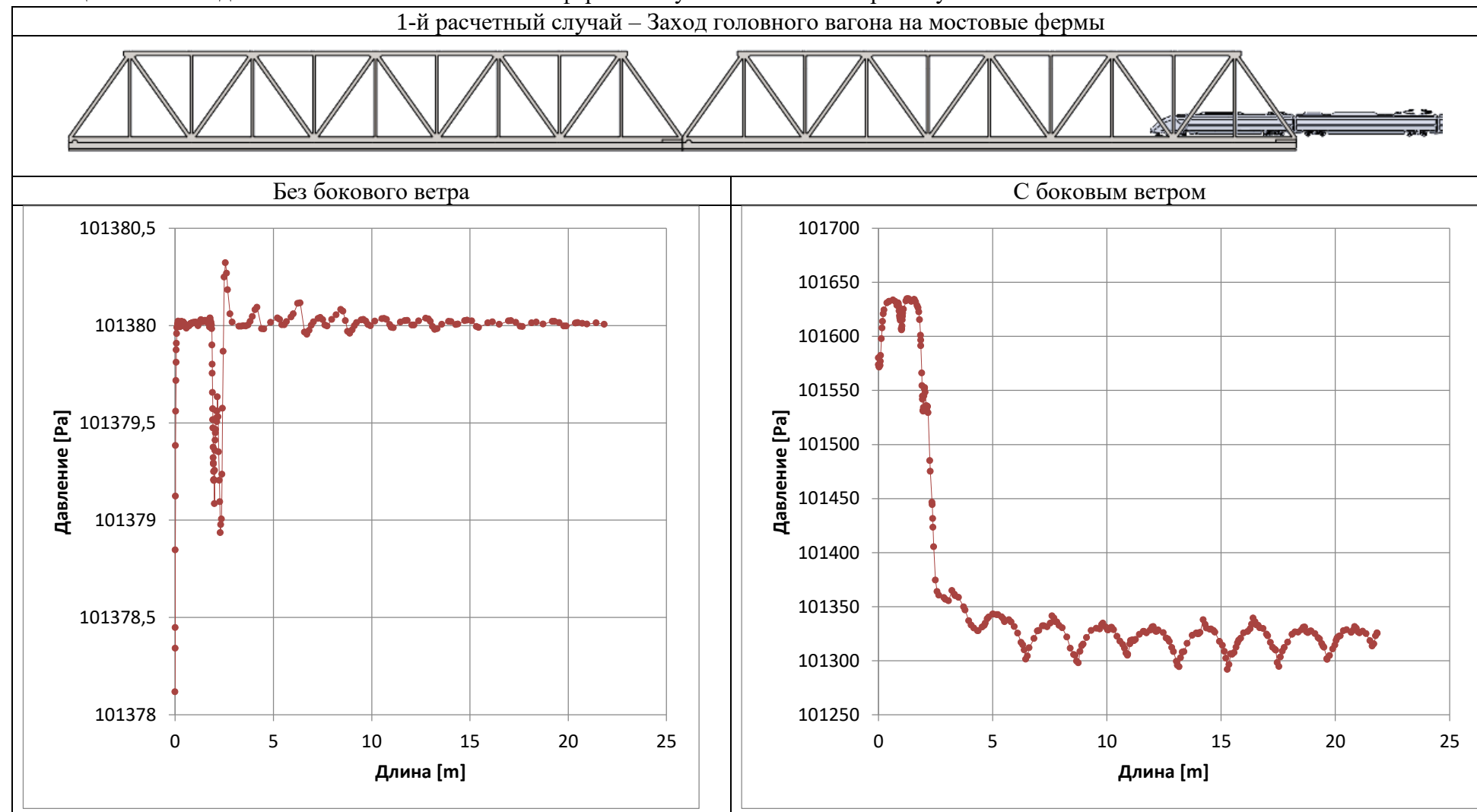
2.11. Результаты численного моделирования динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с возмущенной воздушной средой при движении по пролетному сооружению ферменного моста

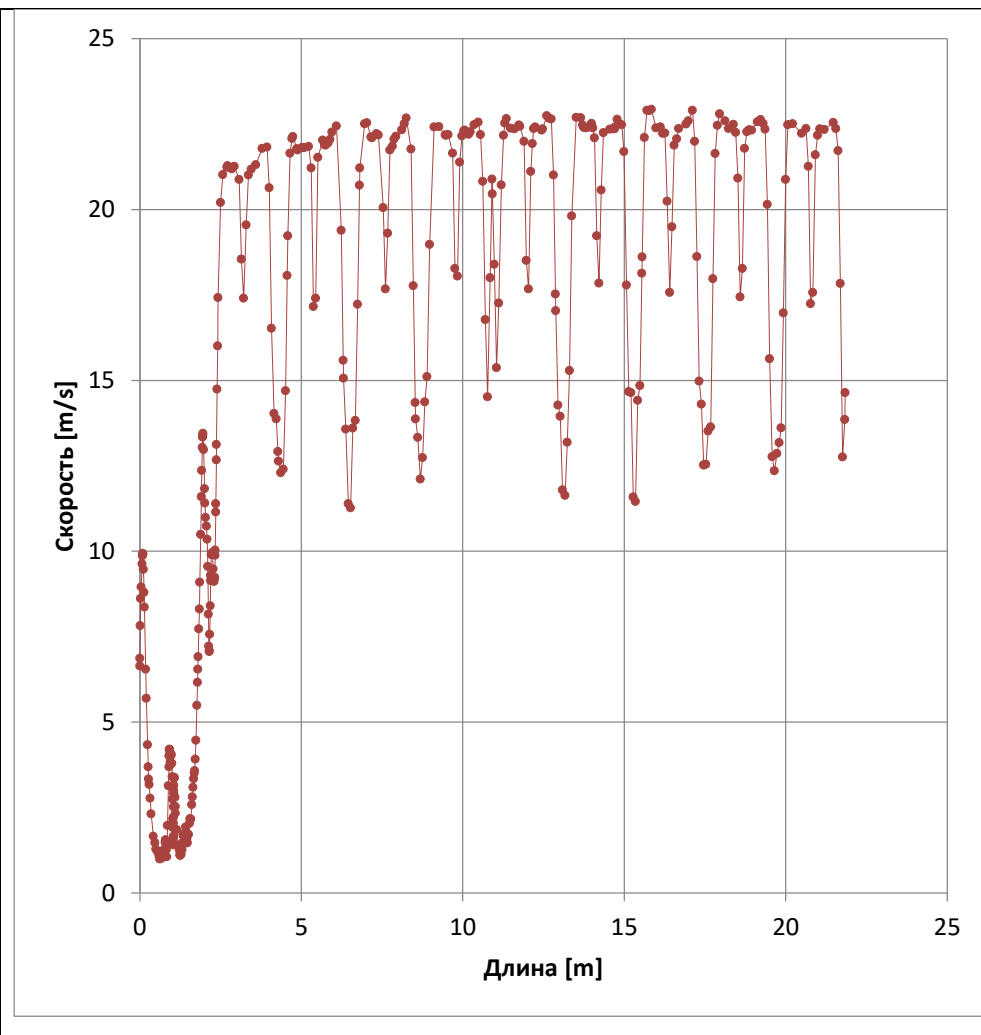
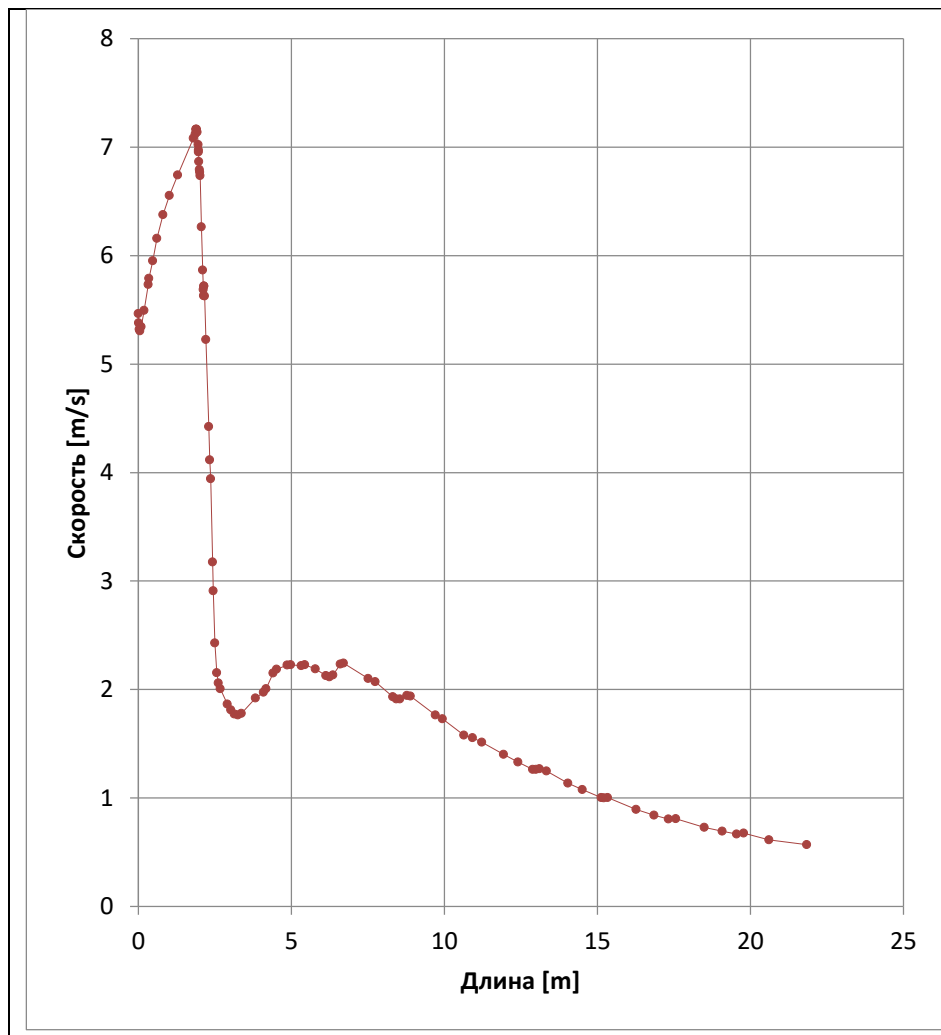
На рисунке 2.24 и таблицах 2.14 – 2.18 представлены изображения, поясняющие общую схему компьютерного эксперимента по численному моделированию динамического взаимодействия ВСПС с возмущенной воздушной средой и объектов путевой инфраструктуры. Результаты сканировались по линии, расположенной вдоль боковой поверхности корпуса состава на дистанции 20 мм, на высоте 1 м над уровнем верха головки рельса (УГР) по длине состава.

При отсутствии боковой ветровой нагрузки картина распределения скоростных потоков практически не отличается от классического варианта – движения состава на открытом пространстве.

С боковой ветровой нагрузкой картина резко отличается: растет динамическое давление на головном обтекателе в среднем на 20 %; на скоростной эпюре отмечается существенное изменение конфигурации скоростных потоков, наблюдается значительный рост амплитуды колебаний по всей длине состава; резко возрастает сопротивление трения вследствие проявления вязкости воздушной среды (завихренность) при омывании структурных элементов ферменной конструкции продолжение в виде системы импульсов по всей длине состава, особенно в районе головного обтекателя, где ускоренная масса увлеченной воздушной среды сталкивается с неподвижными элементами фермы моста (см. табл. 2.14)

Таблица 2.14 – Заход головного вагона на мостовые фермы без учета бокового ветра и с учетом.





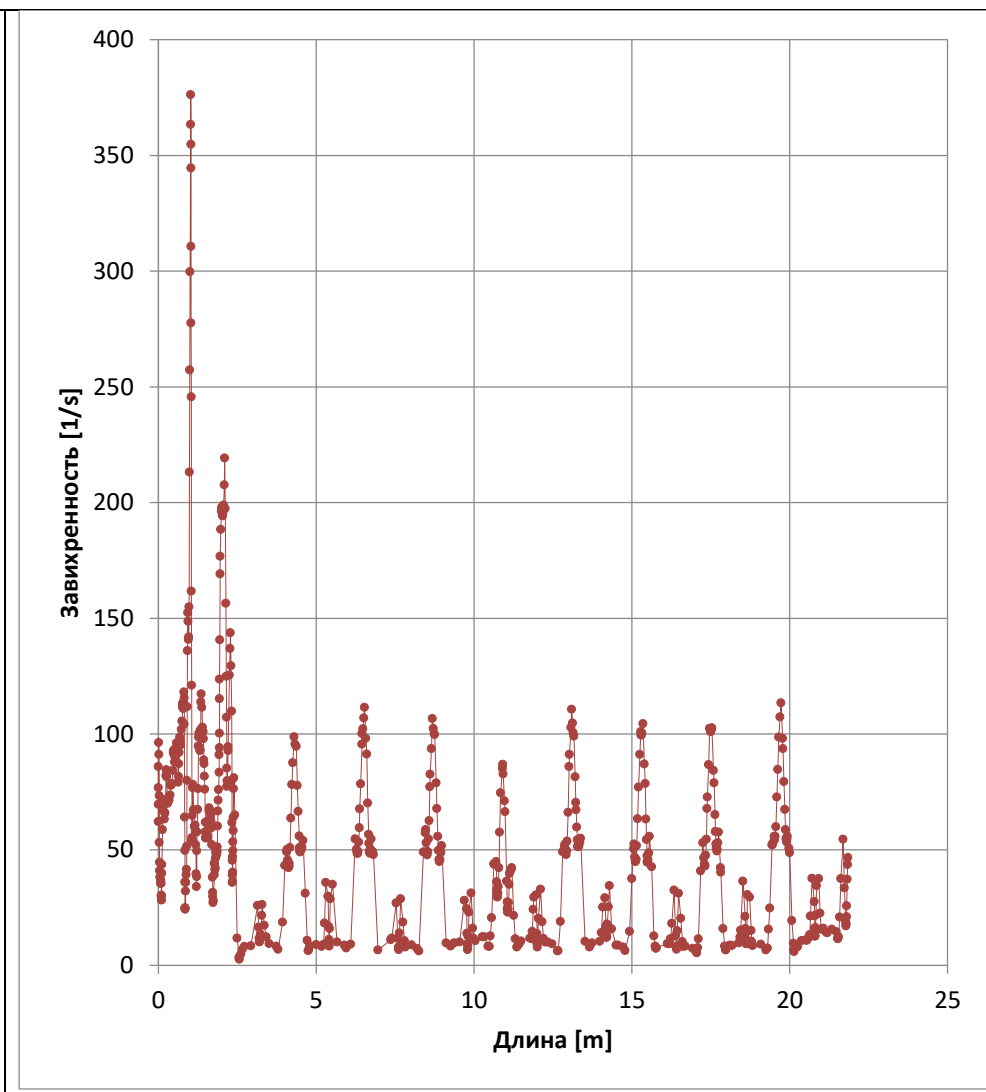
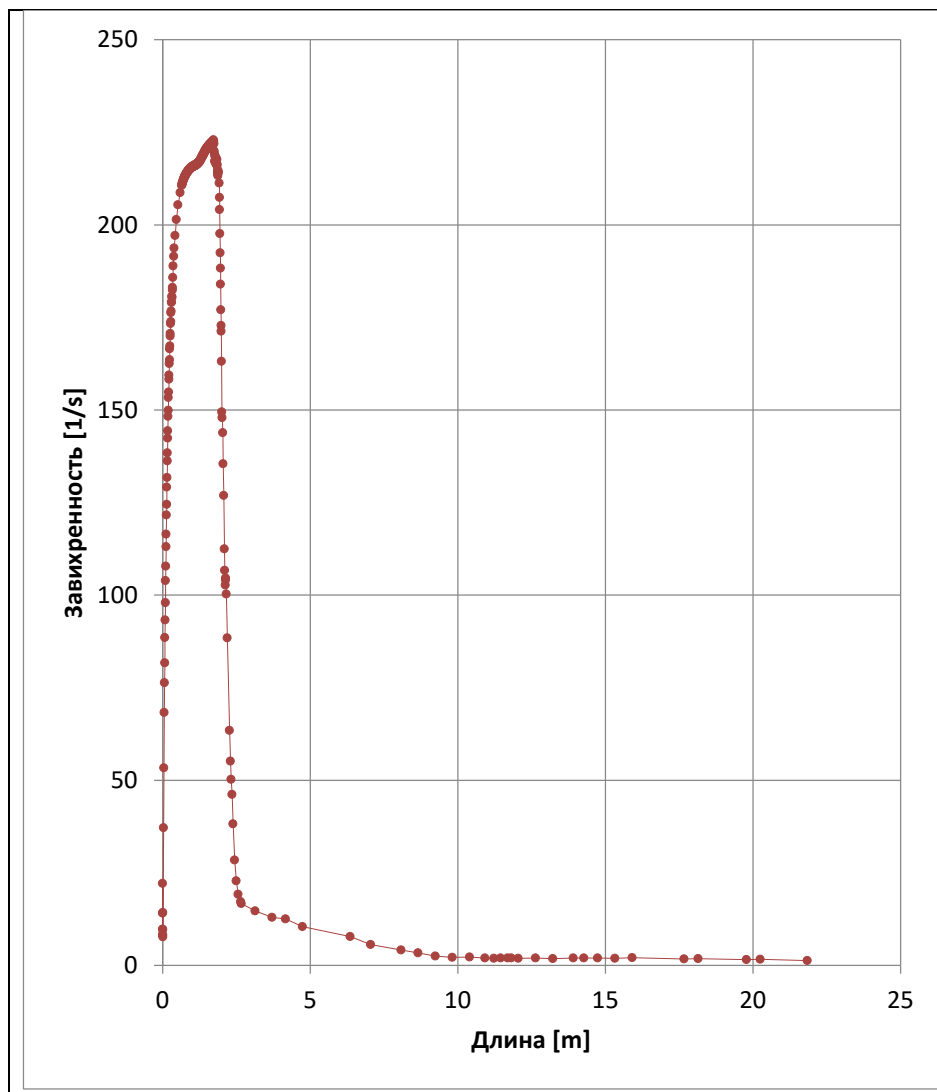
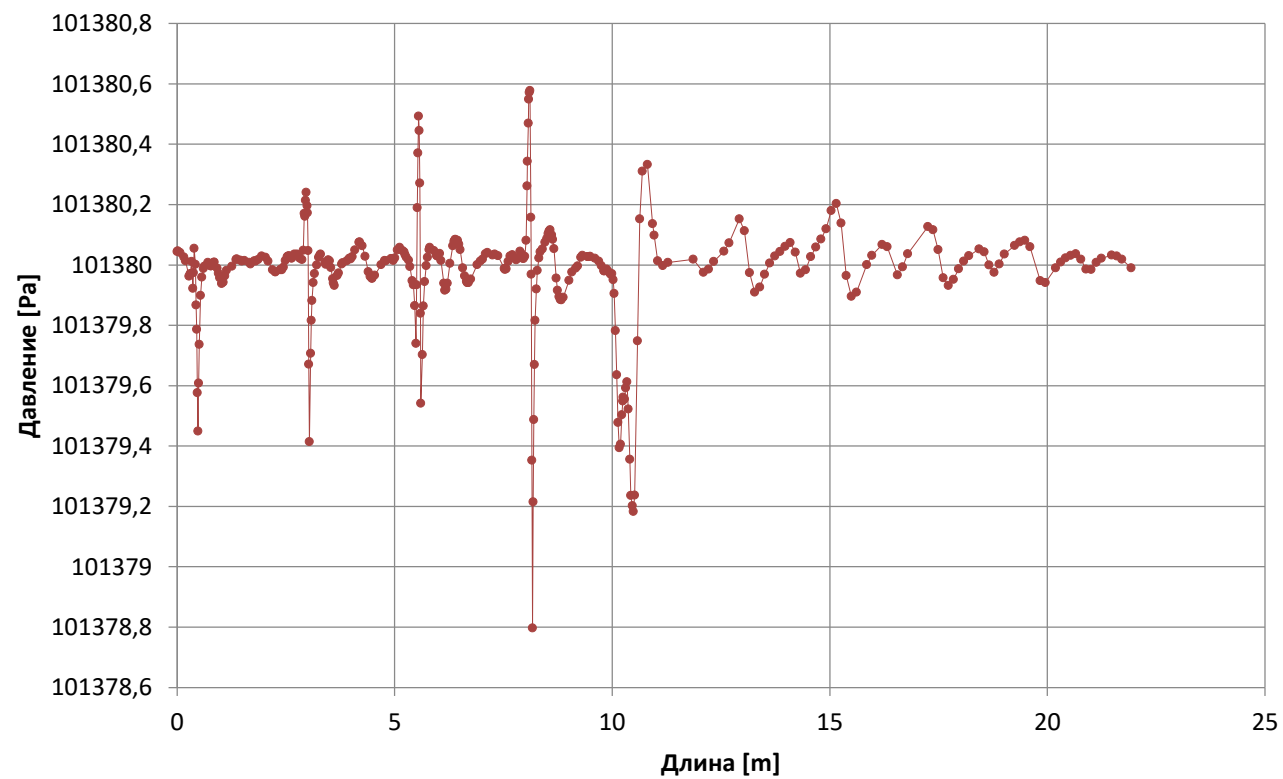
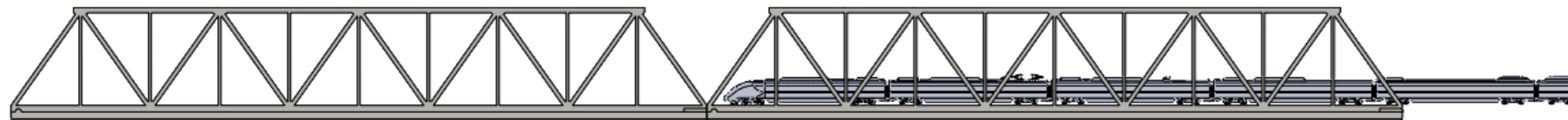


Таблица 2.15 – Аэродинамического взаимодействия ВСПС с структурными элементами ферменной конструкции моста

2-й расчетный случай – Заход состава на первую ферму целиком



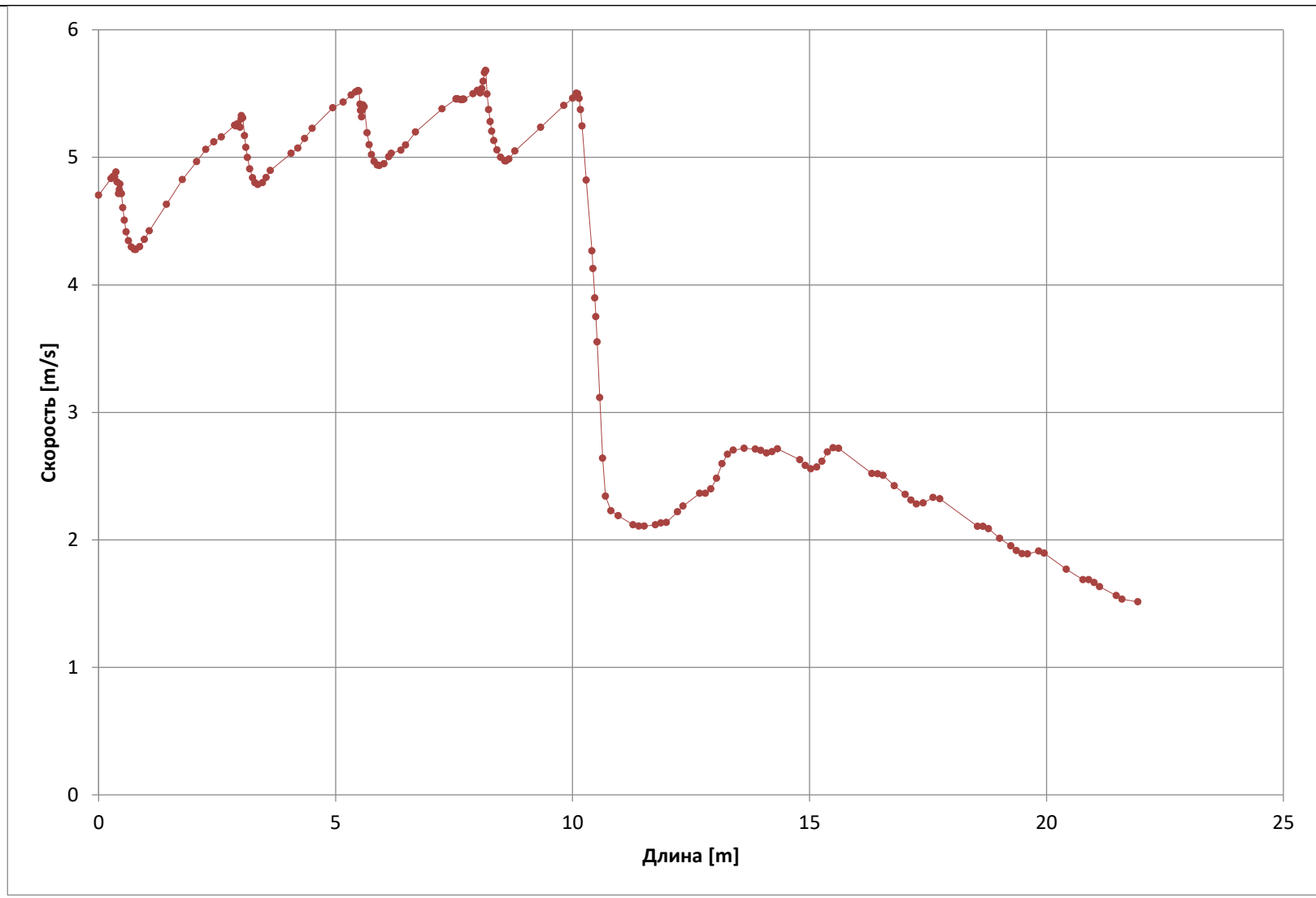
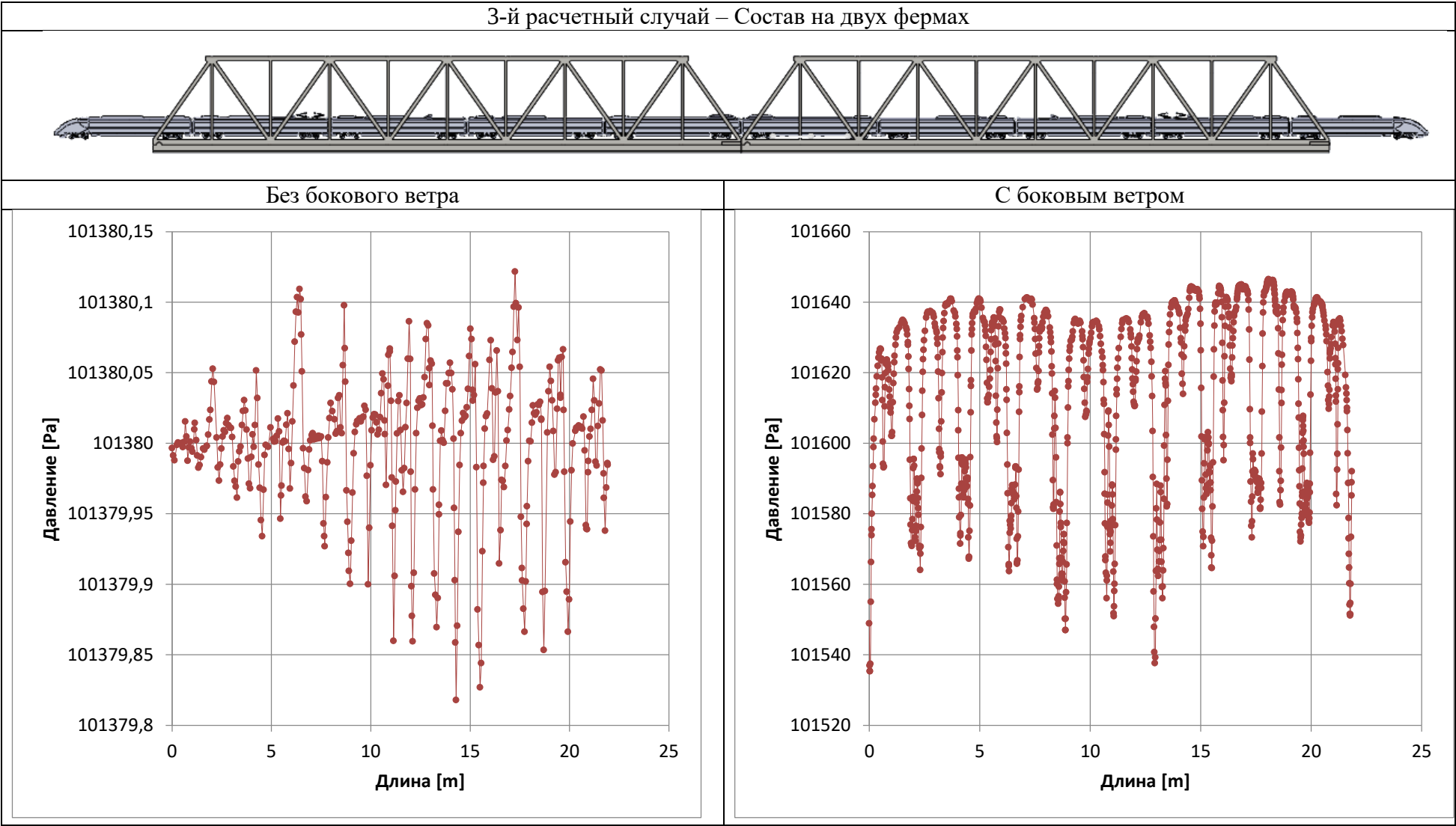
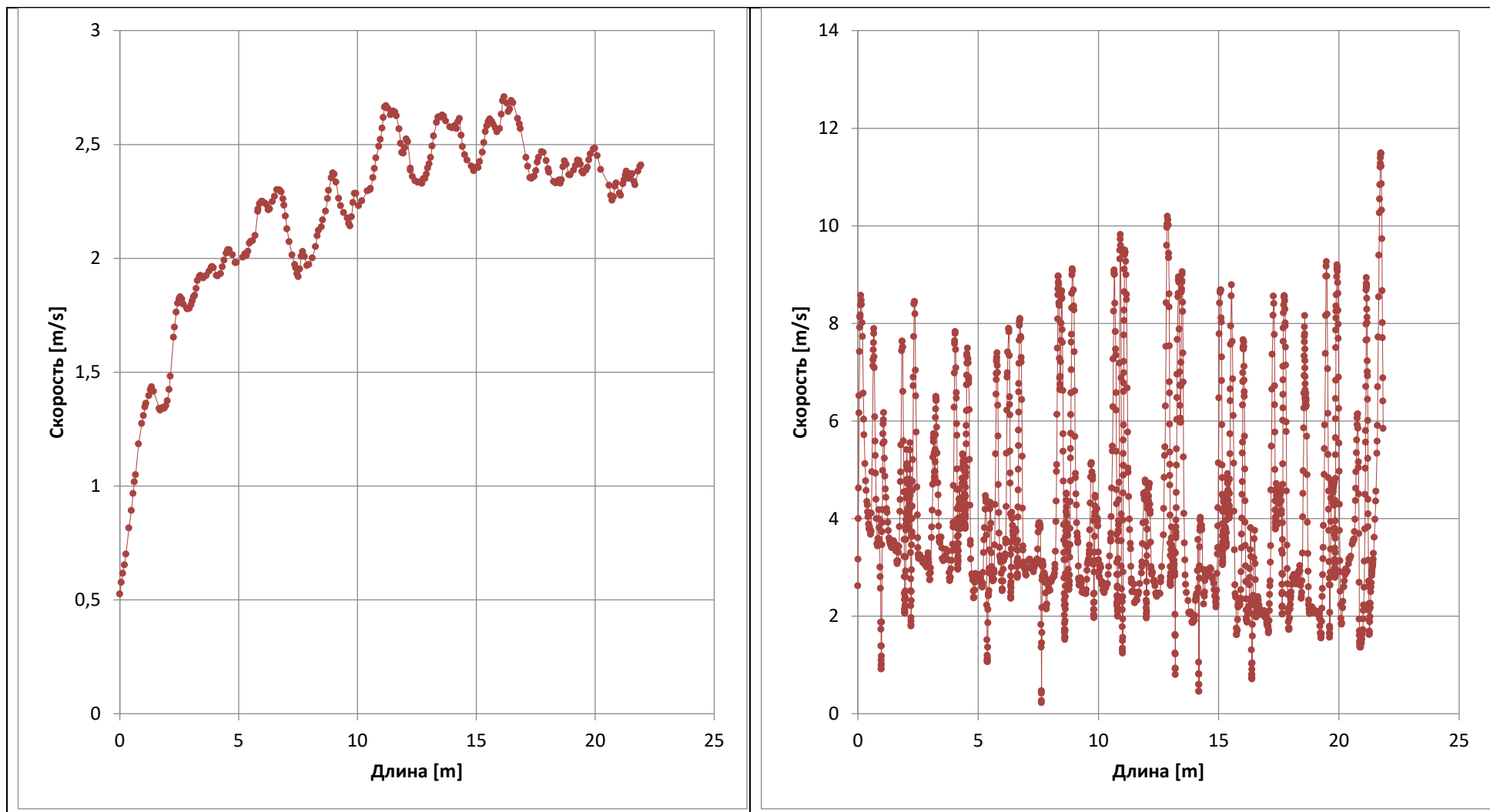


Таблица 2.16 – Аэродинамического взаимодействия ВСПС с структурными элементами ферменной конструкции моста





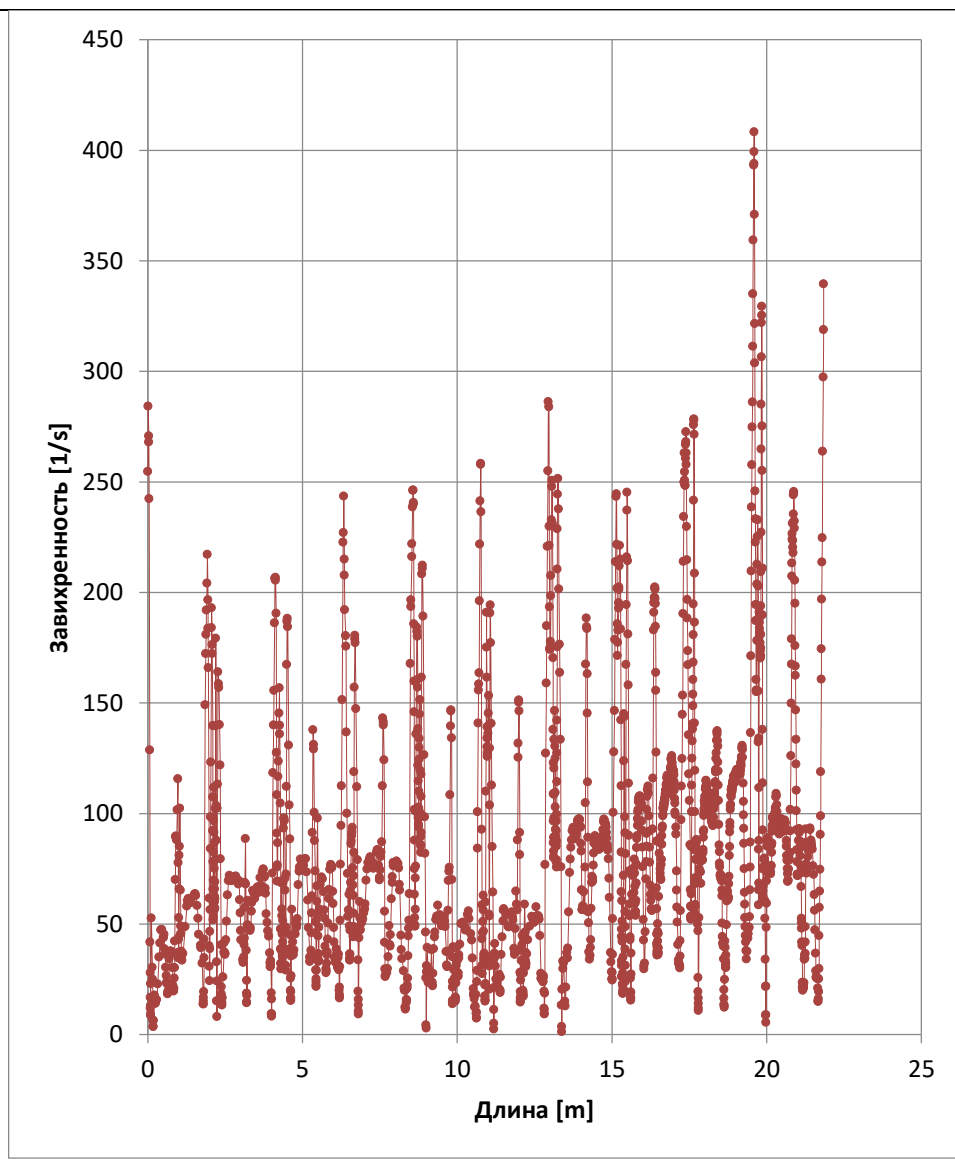
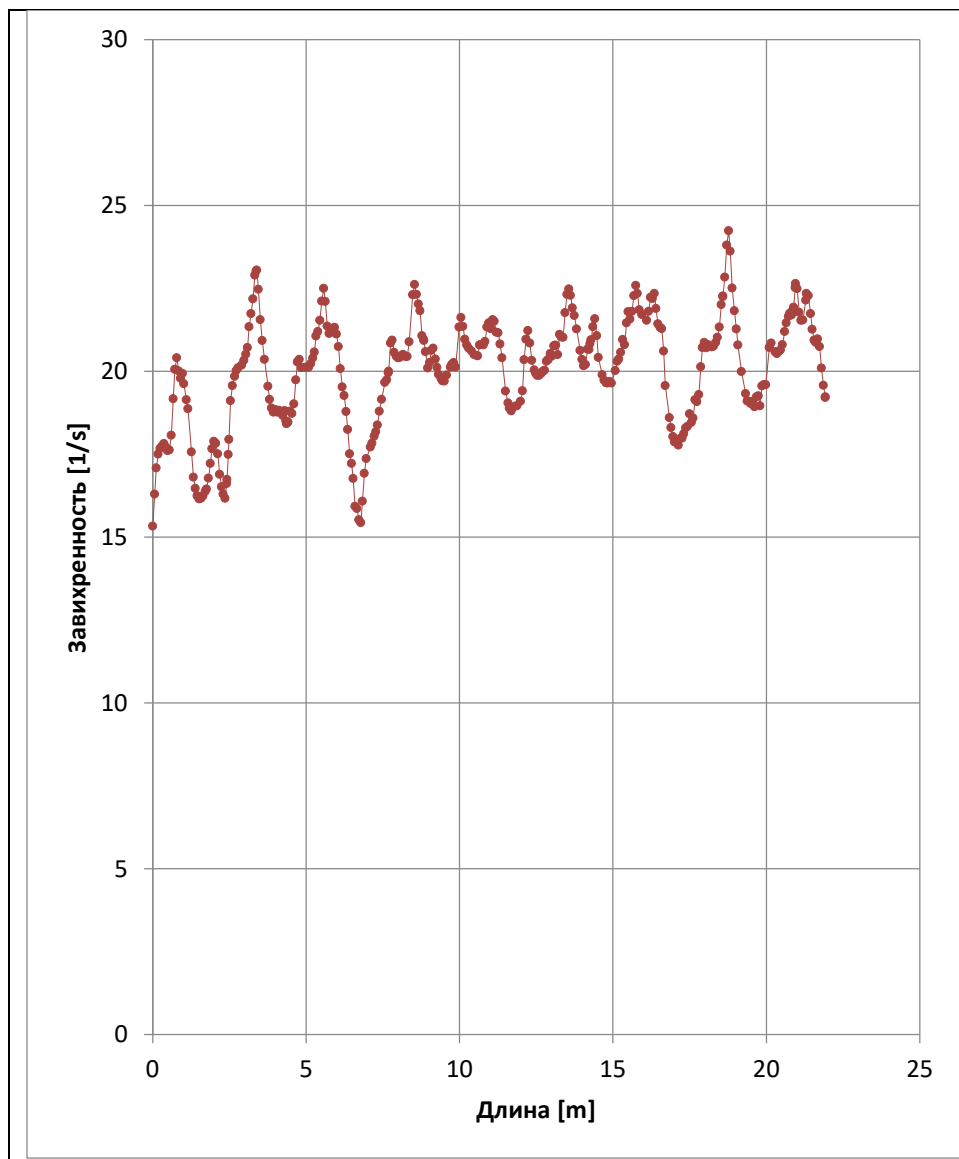
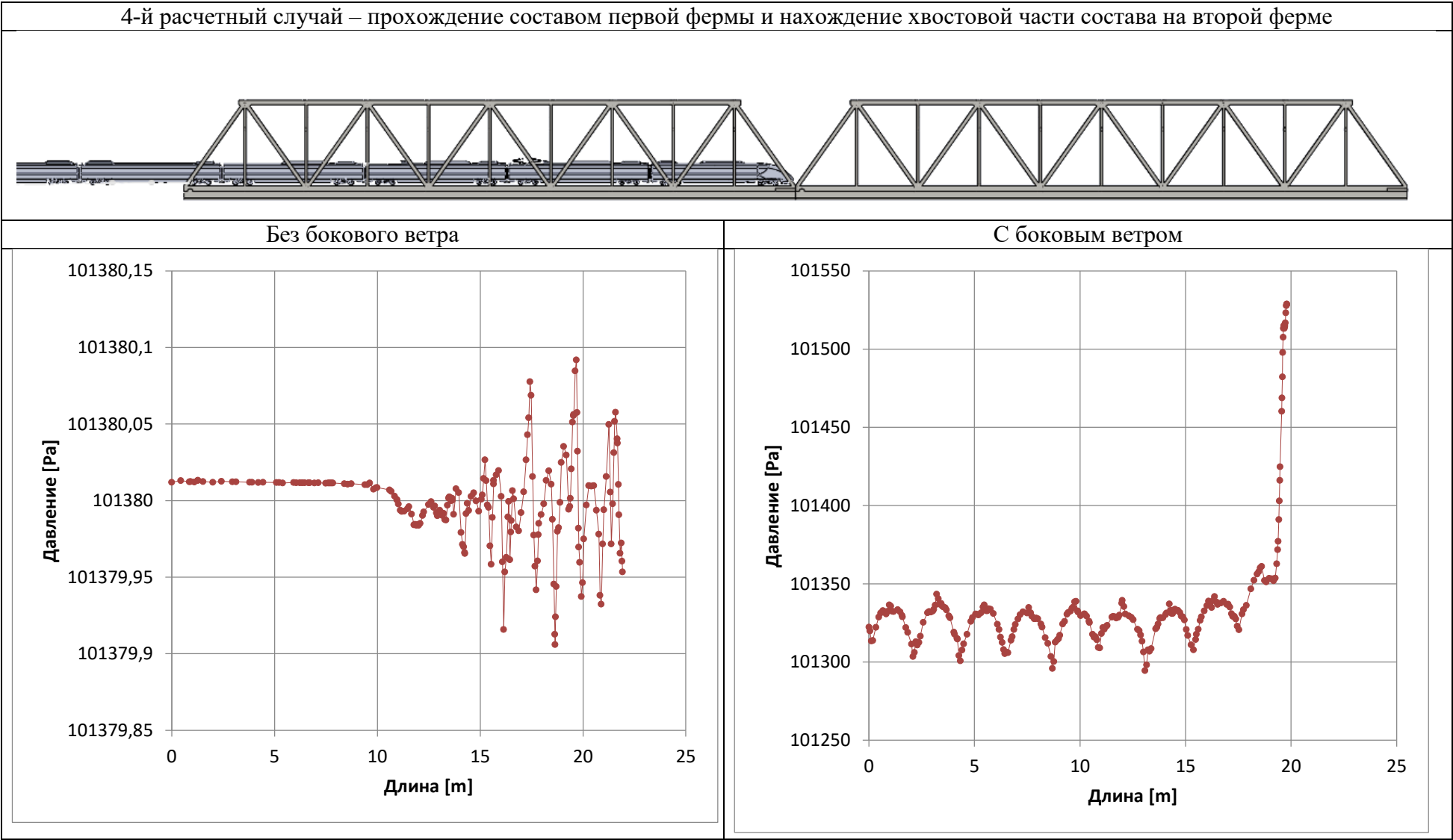
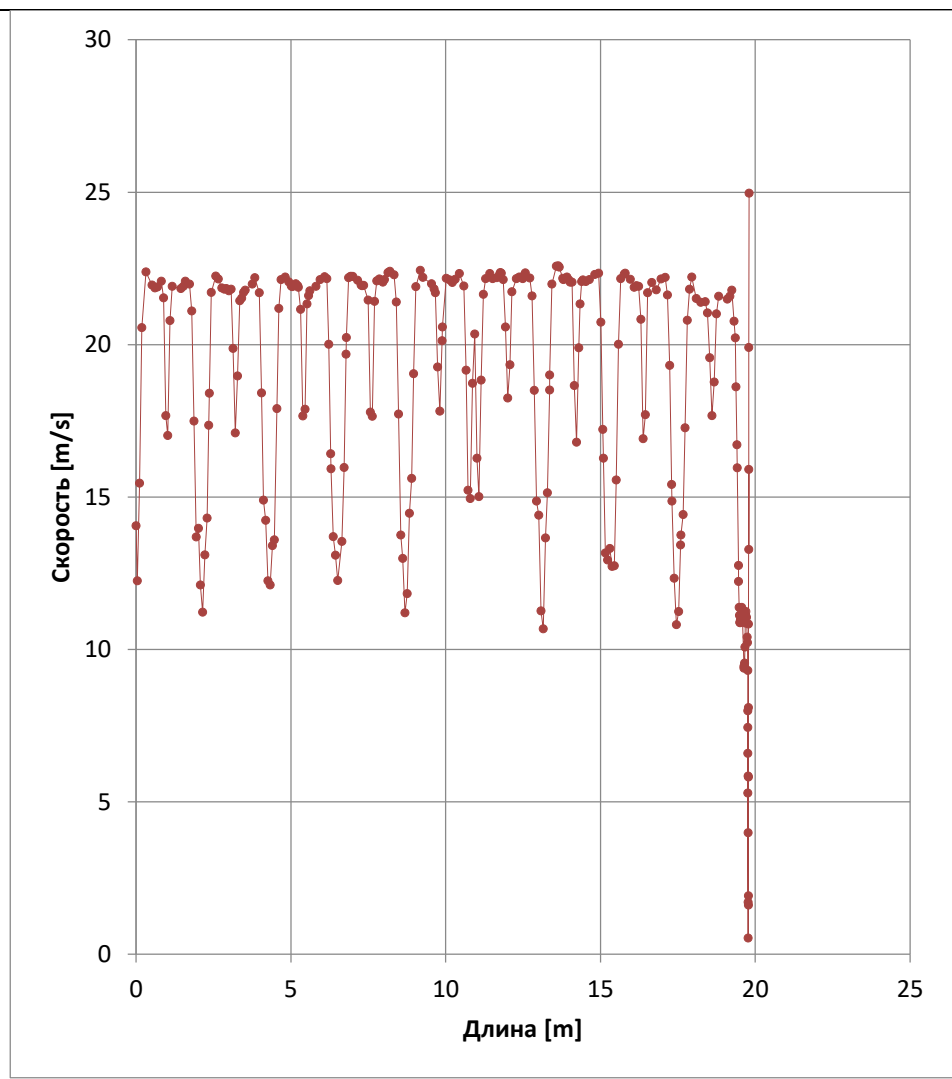
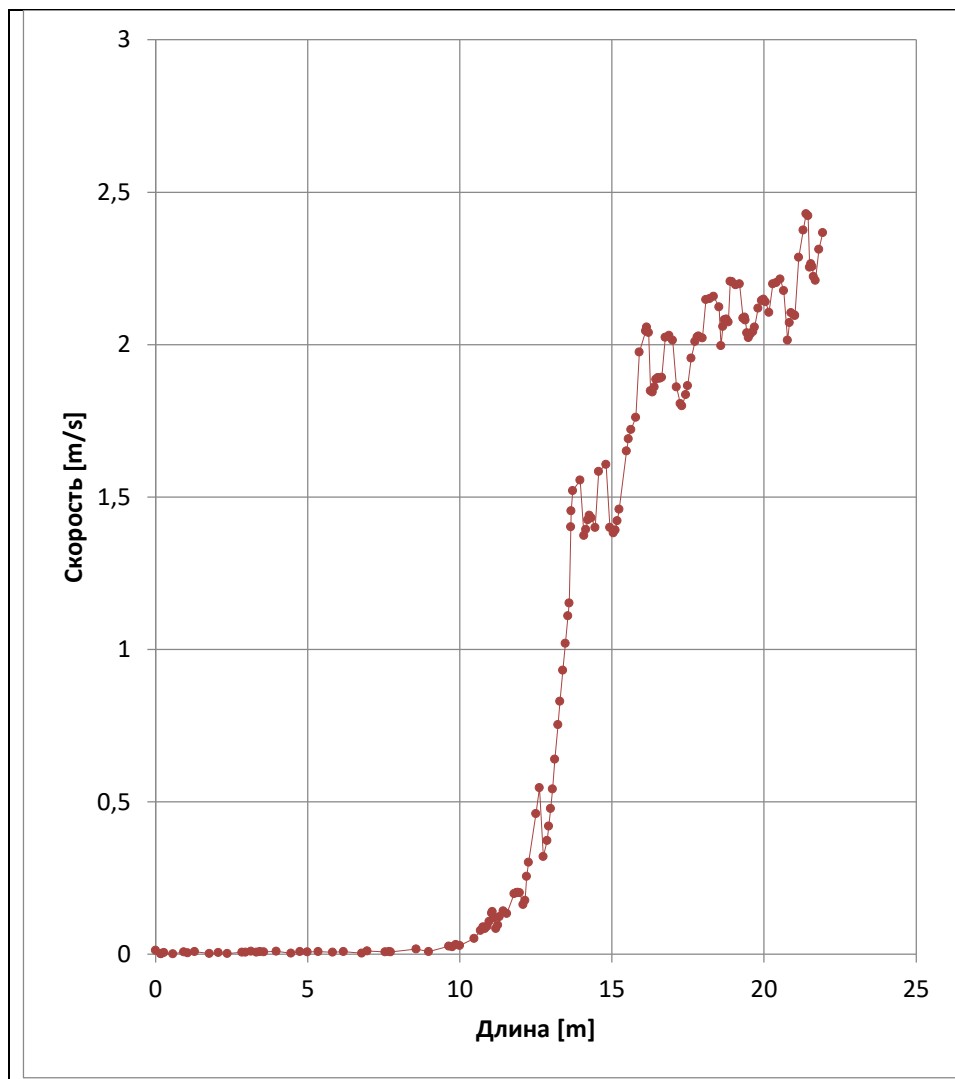
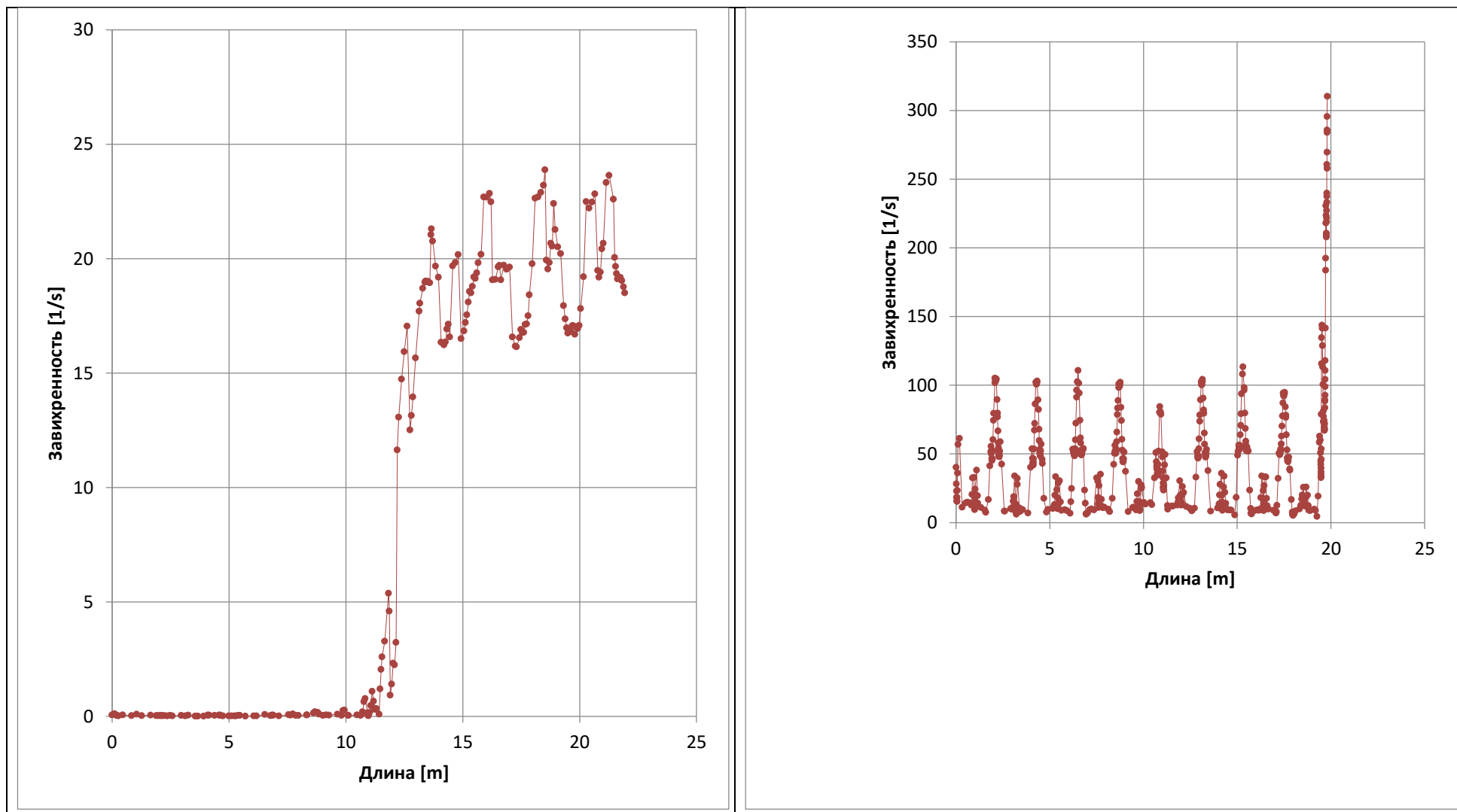


Таблица 2.17 – Аэродинамического взаимодействия ВСПС с структурными элементами ферменной конструкции моста







При полном заходе состава на первую ферму колебание давления стабилизируется, головной импульс отсутствует, максимальные амплитуды незначительны (менее 2 Па); скоростная эпюра отражает незначительные скорости потоков (менее 2 м/с), с изменением характера колебаний после середины фермы (табл. 2.16).

В отсутствие боковой ветровой нагрузки при полном заходе состава на обе фермы колебание давления стабилизируется, головной импульс отсутствует, максимальные амплитуды незначительны (менее 2 Па); скоростная эпюра отражает незначительные скорости потоков (менее 2 м/с), с изменением характера колебаний после середины фермы.

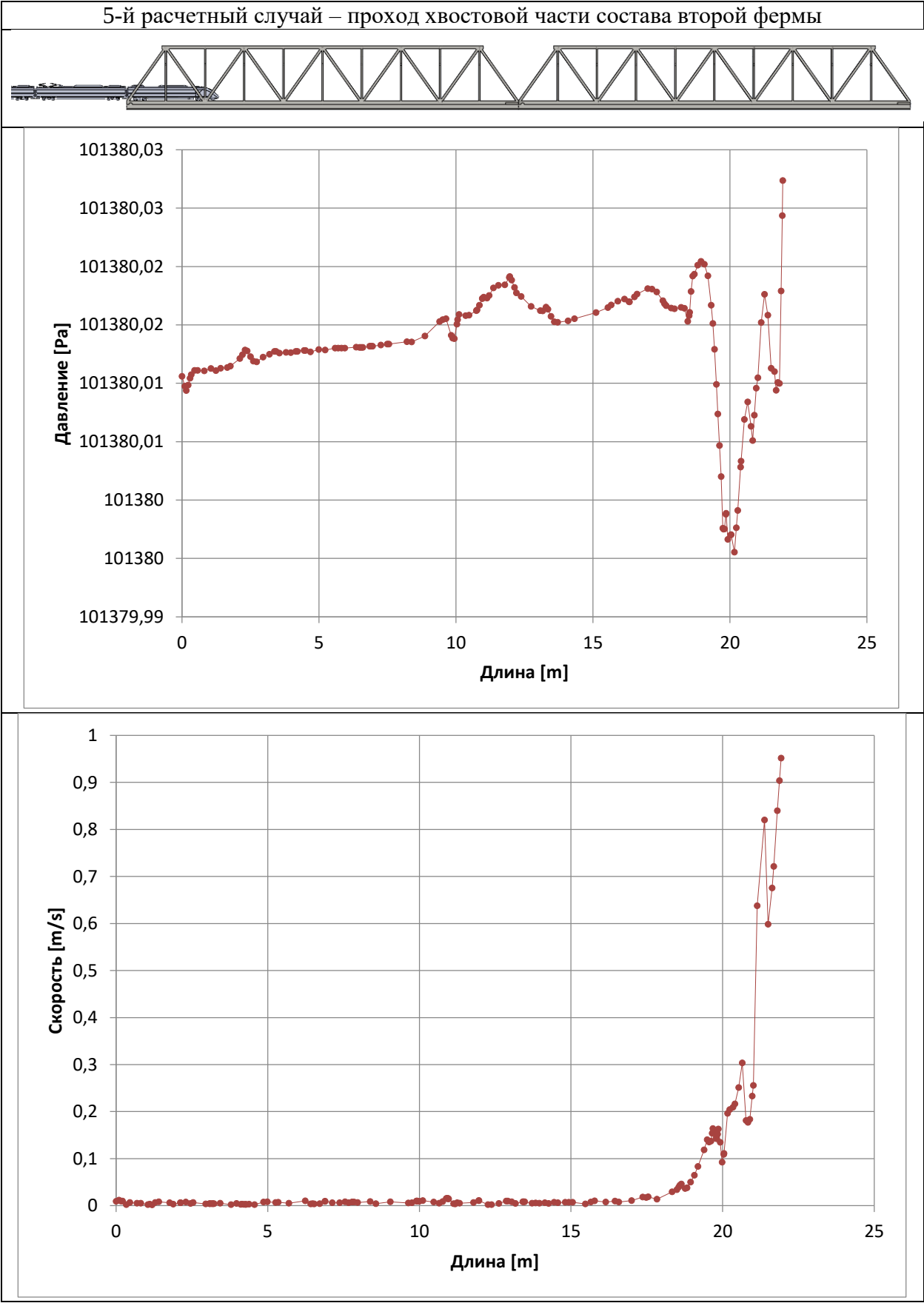
С боковой ветровой нагрузкой растет динамическое давление на головном обтекателе и на протяжении всего состава превышает в среднем на 260 Па; на скоростной эпюре отмечается существенное изменение конфигурации скоростных потоков, - значительных рост (в 8 раз) амплитуды колебаний по всей длине состава; сопротивление трения возникает вследствие проявления вязкости воздуха – завихренность, также кратно возрастает (в среднем в 30 раз), и имеет продолжение в виде системы импульсов возрастающей мощности колебательных импульсов по всей длине состава.

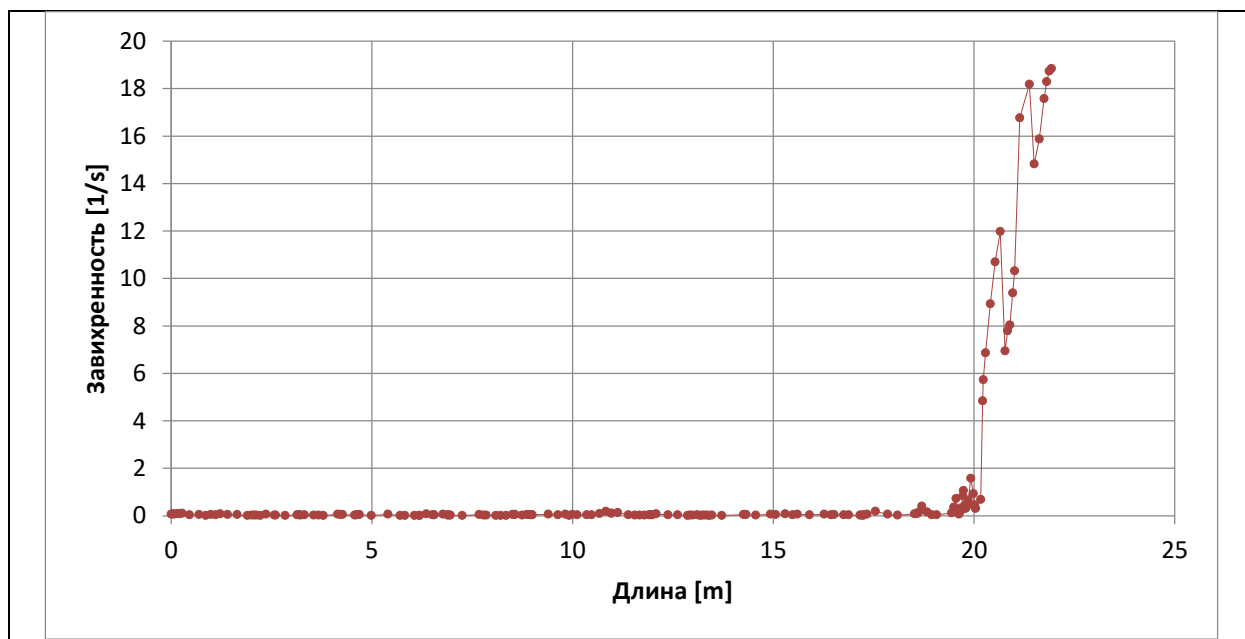
При нахождении хвостовых вагонов состава в пределах второй фермы картина возмущенной воздушной среды соответствует предыдущему расчетному случаю.

При проходе хвостовыми вагонами состава пределов второй фермы картина возмущенной воздушной среды также соответствует предыдущему расчетному случаю.

По результатам исследования установлен факт характерного формирования структуры возмущенной воздушной среды в процессе омыwania контуров подвижного состава совместно с периферийной путевой структурой.

Таблица 2.18 – Аэродинамического взаимодействия ВСПС с структурными элементами ферменной конструкции моста

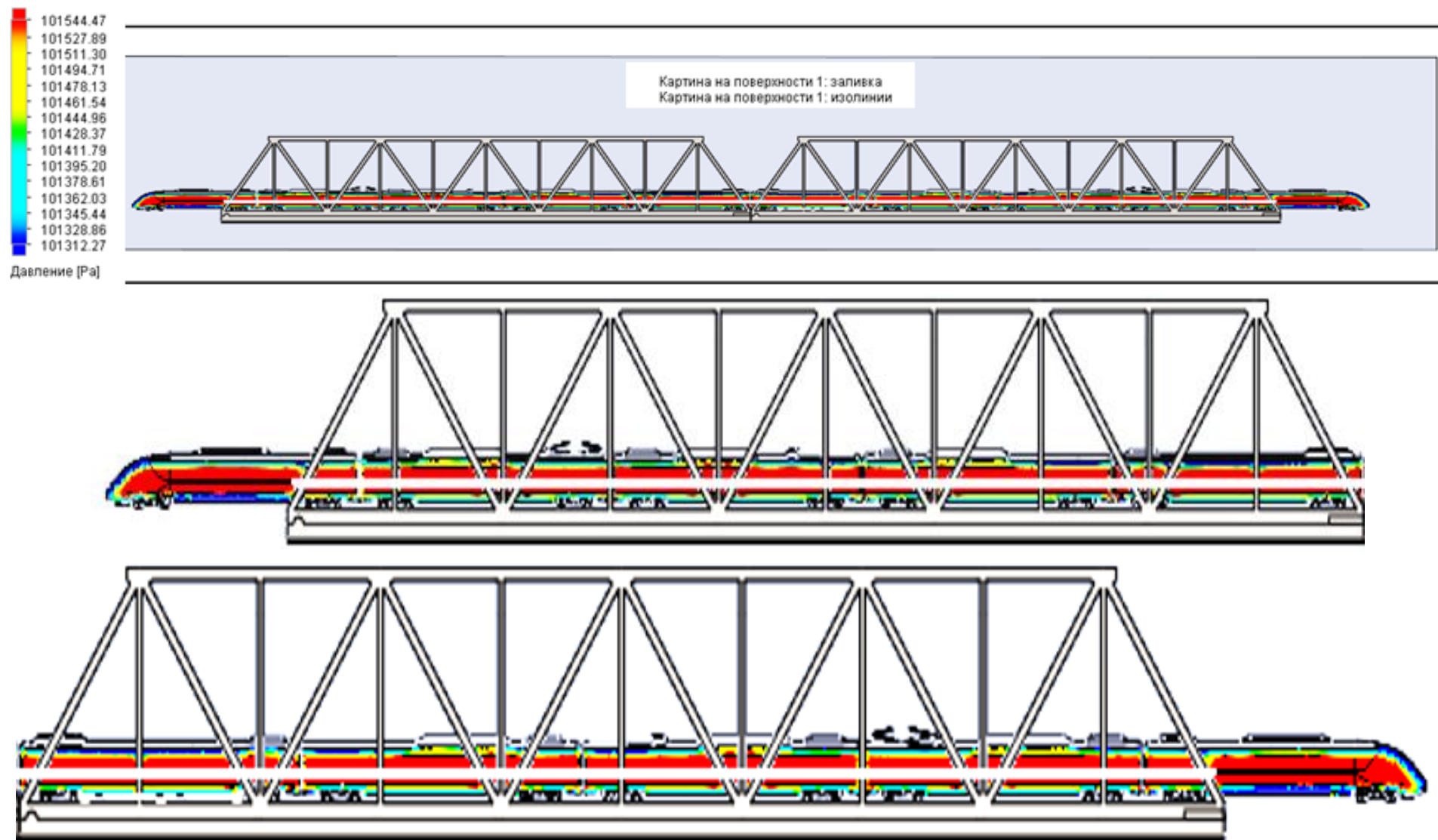




Увлекаемая движущимся поездом масса воздушной среды при прохождении составом габаритов ферменного сооружения вызывает торможение части увлеченного объема воздуха вследствие его взаимодействия с элементами мостовой конструкции, представленное колебаниями скорости воздушной среды пилообразной формы в непосредственной близости к поверхности, что является негативным фактором, поскольку оказывает дополнительное сопротивление движению 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 (рис. 2.20), 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.

Полученные таким образом данные будут использованы в качестве нагружающих факторов при моделировании податливости подвески подвижного состава.



Выводы по главе 2

1. Предложены математические модели и выполнено численное моделирование процесса аэродинамического воздействия на высокоскоростной подвижной состав при его движении по эстакаде и пролетному строению моста ферменной конструкции в прибрежной зоне в условиях десятибального шторма (по шкале Бофорта).

2. На основе выполненного численного моделирования установлена картина распределения воздушных потоков вблизи движущегося поезда и определены величины давлений на его поверхности, обусловленные явлениями инерционного наддува и увлечения воздушной среды движущимся поездом.

3. 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 вызывает усложнение характера их колебательного процесса, создает опасный бортовой крен части состава, сопровождающийся обезгруживанием колес.

4. Установлено, что при скорости движения поезда 200 км/ч, усиление бокового ветра с 12 м/с до 36 м/с вызывает рост углового отклонения положения вагона на 32 %, а также увеличение времени процесса стабилизации подрессоренных масс на 10 %. При этом уровень нагрузки на левое ходовое колесо на передней тележке ниже предельно допустимого минимального значения на 10 % от весовой номинальной нагрузки, что повышает риск потери сцепления колеса с рельсом, и, следовательно, снижает эффективность процесса торможения при заданном скоростном режиме.

5. Показано, 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.

6. Выявлено, что при омывании потоками воздушных масс элементов фермы, которая представляет собой перфорированную структуру, формируются области завихрения повторяющихся формы, шаг которых соответствует числу проемов конструкции. При этом периодическое силовое воздействие разделенного потока на боковую поверхность состава способствует возникновению явления резонанса, что увеличивает амплитуду колебаний наддрессорного строения движущегося поезда.

7. Рекомендуется использовать трёхмерные нестационарные модели на основе методов гибридного компьютерного моделирования, которые позволяют наиболее полно учитывать конструктивные особенности мостовых ферм, распределение воздушных масс и условия, недостижимые при натурных и стендовых испытаниях (такие как экстремальный боковой ветер).

ГЛАВА 3 ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С УЧЕТОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

3.1 Моделирование угловой податливости корпусов экипажной части высокоскоростного подвижного состава с учетом жёсткостных характеристик его ходовой части

Устойчивость подвижного состава, эффективность реализации его тяговых и тормозных характеристик зависят от площади контакта рельса и колеса, а также от усилий, действующих на контактной площадке. В условиях динамических нагрузок, обусловленных действием бокового ветра и неравномерным распределением давления по длине поезда, необходимость расчета контактного давления и определения на этой основе критических факторов, предшествующих сходу подвижного состава или возникновению опасных колебаний, приобретает особую важность.

Как известно, при анализе динамики подвижного состава и расчете усилий и деформаций, распределенных по его длине, поезд часто представляют в виде системы сосредоточенных масс, соединенных с помощью упруго-диссипативных связей. Практика таких расчетов предполагает отсутствие влияния аэродинамических процессов. При анализе влияния бокового ветра учет этих явлений приобретает первостепенную важность. В настоящее время для анализа таких явлений часто применяется метод FSI (Fluid-Structure Interaction) – взаимодействие тела и жидкости, что реализуется во многих программных пакетах. Применение данного подхода требует значительных затрат вычислительных ресурсов, поскольку здесь требуется применение итерационного перестроения сетки вблизи границы поезд – среда, поскольку взаимное расположение тележек и корпусов вагонов будет изменяться под действием аэродинамических нагрузок. Учет колебаний, обусловленных движением поезда, делает эту задачу практически неразрешимой. В настоящей работе предложен комбинированный подход к решению данной задачи: механические процессы в подвеске и относительное смещение вагонов и тележек рассчитывается с помощью расчетных схем, а затем на основе полученных перемещений тележек

и вагонов корректируется трехмерная расчетная модель. Процесс повторяется до тех пор, пока измерение перемещения не станет меньше некоторого порогового значения. Этот подход позволяет существенно упростить процесс расчетов и сократить вычислительные затраты особенно на этапе предварительной оценки допустимых значений неравномерности распределения контактных усилий на контактной площадке колесо-рельс.

Система подвешивания пассажирского поезда Velaro RUS (ЭВС1/ЭВС2 «Сапсан») двухуровневая:

- первичное рессорное подвешивание (колесо – тележка) реализуется одноповодковыми буксами, гидравлическими гасителями вертикальных колебаний и цилиндрическими винтовыми пружинами – 1400 кН/м;

- вторичное рессорное подвешивание (тележка – кузов) реализуется при помощи пневмобаллонов, гидравлических гасителей вертикальных, поперечных колебаний и виляния – 670 кН/м.

Кроме того, конструкция ходовых устройств поезда оборудована устройством поперечной устойчивости (от раскачивания): первичное – 1100 кН/м; вторичное – 410 кН/м.

Конструкцию подвешивания ходового устройства поезда можно представить, как двухуровневую систему верхних и нижних вертикально установленных осцилляторов, соответственно определяющих жесткость первичного и вторичного подвешивания, а также горизонтально расположенными осцилляторами, определяющими поперечную жесткость подвески (рис. 3.1).

В качестве граничного условия критерия устойчивости вагона служит величина отношения удерживающего момента к опрокидывающему [61] в пределах значения $n = 1,25$.

$$n = \frac{Q * L_Q}{F_{H2}L_{H2} + F_{H1}L_{H1} + F_{V1}L_{Fv1} + F_{V2}L_{Fv2}} > 1,25 \quad (3.1)$$

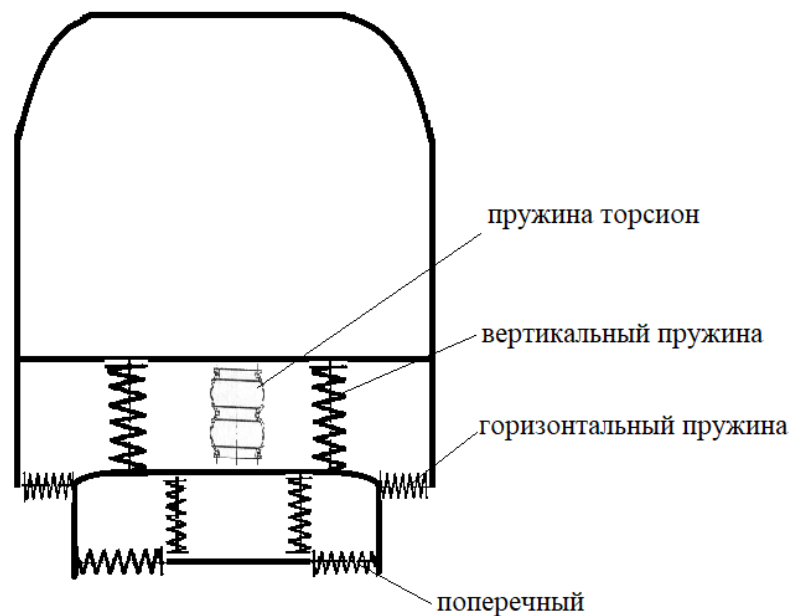


Рисунок 3.1 – Модель конструкции подвешивания ходового устройства вагона

3.2 Алгоритм создания многотельной динамической модели подвижного состава

При использовании предложенного метода подвеску рассматривали как двухуровневую систему, состоящую из верхних и нижних вертикально установленных осцилляторов, соответственно определяющих жесткость первичного и вторичного подвешивания (1), а также горизонтально расположенными осцилляторами (2), определяющими поперечную жесткость подвески как показано на рисунке 3.2.

Создание адекватной компьютерной модели подвески поезда – сложная инженерная задача, требующая учёта множества параметров, таких как динамические характеристики системы, взаимное воздействие различных её компонентов, а также влияние внешних условий, как со стороны кузова (непосредственно сопряжённого и соседних), так и контактных пар колесо-рельс. Перед началом моделирования необходимо:

1. Изучить конструкцию подвески и определить элементы моделирования (рычаги, амортизаторы, стабилизаторы и т. д.).
2. Определить геометрические и массовые параметры элементов.
3. Определить кинематическую схему вагона.

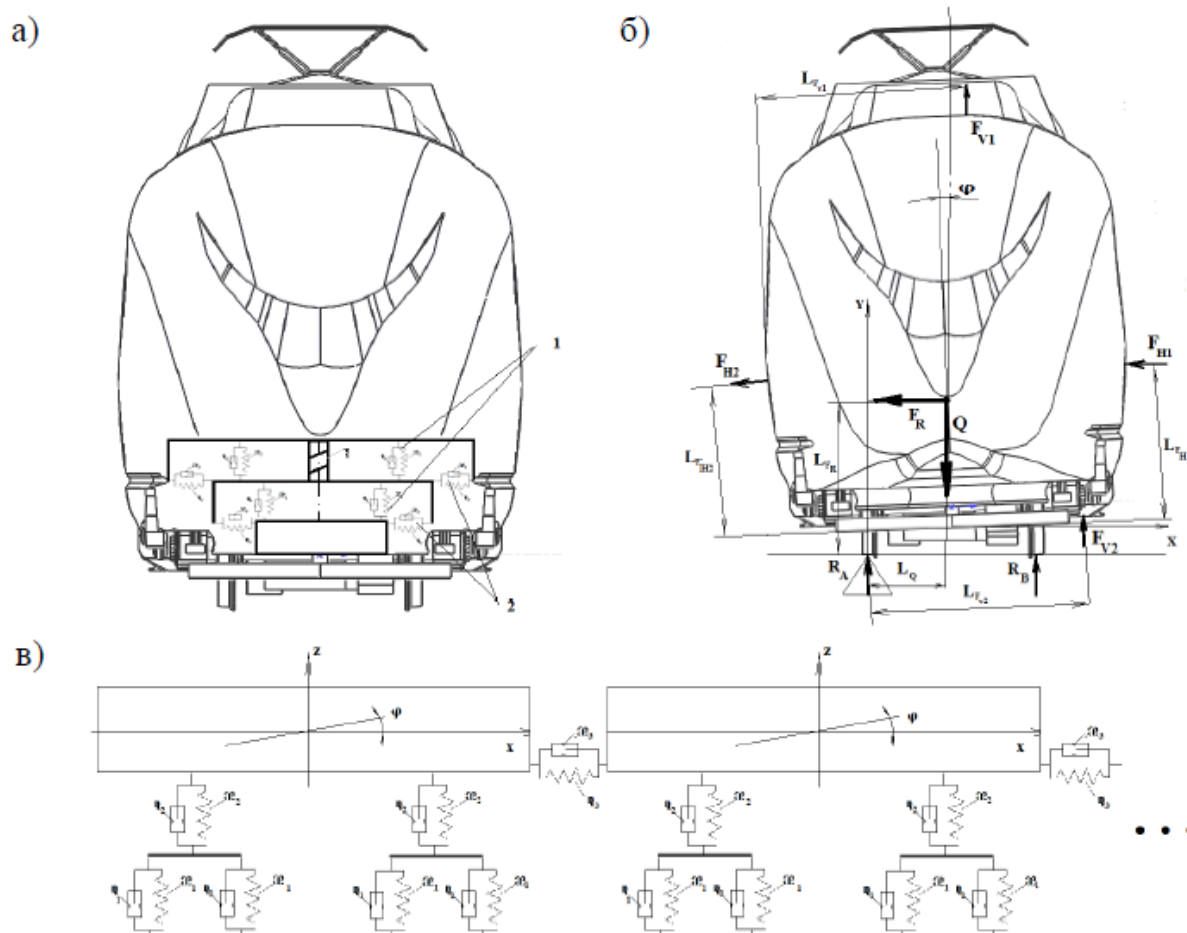


Рисунок 3.2 – Схема определения боковой устойчивости подвижного состава:
 а – моделирование конструкции подвешивания ходового устройства вагона;
 б – схема нагружения кузова вагона; схема пружинно-фрикционных связей многофюзеляжной системы подвижного состава: Здесь: Q – сила тяжести;
 L_{FR} – расстояние до центра тяжести; F_R – сила ветра; Q – сила тяжести;
 F_{V1} – подъёмная сила на крыше (1, 2 кластер); F_{V2} – подъёмная сила на днище (3 кластер); F_{H1}, F_{H2} – боковые силы (F_{V2} – 4, 5 кластер); L_{FV1}, L_{FV2} – расстояние до точки приложения подъёмной силы на крыше и на днище; L_{FH2}, L_{FH1} – расстояния до точки приложения боковых сил; L_Q – расстояние до точки приложения силы тяжести

Компьютерная модель должна включать все жёсткие и упругие компоненты подвески, положение которых определяет положение кузова относительно некоторой базы (примем в качестве такого компонента раму тележки): рычаги первого уровня подвески, поперечную балку, первичные и вторичные упругие элементы и соответствующие им демпферы. Кинематическая схема тележки показана на рисунке 3.3 [64 - 68].

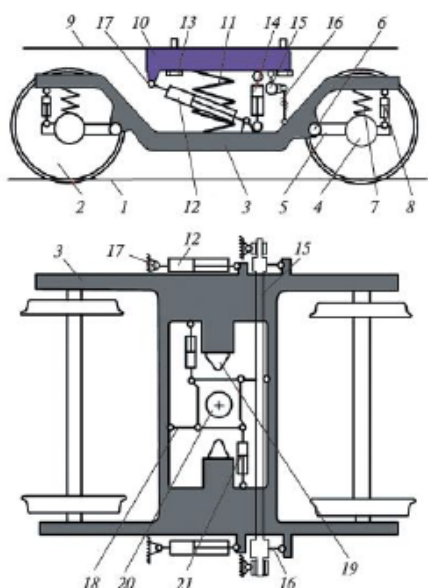


Рисунок 3.3 – Кинематическая схема моторной тележки (вид сбоку и сверху): 1 – уровень головок рельсов; 2 – колесная пара; 3 – сварная рама тележки; 4 – букса колесной пары; 5 – разъемный (разрезной) буксовый рычаг (балансир) 1-й ступени рессорного подвешивания; 6 – сайлент-блок буксового рычага 1-й ступени рессорного подвешивания; 7 – цилиндрическая пружина 1-й ступени рессорного подвешивания; 8 – демпфер гашения вертикальных колебаний 1-й ступени рессорного подвешивания;

9 – уровень боковой продольной балки кузова; 10 – траверса тележки; 11 – пневморессора 2-й ступени рессорного подвешивания (на схеме условно изображена в виде пружины); 12 – демпфер виляния тележки; 13 – болт крепления траверсы к раме кузова; 14 – демпфер гашения вертикальных колебаний кузова 2-й ступени рессорного подвешивания; 15 – балка торсиона поперечной устойчивости кузова; 16 – регулируемая тяга балки торсиона поперечной устойчивости кузова; 17 – шарнирное крепление демпфера виляния к траверсе тележки; 18 – тяга передачи продольных усилий; 19 – ограничительно-упорный резиновый буфер; 20 – шкворень траверсы, вставленный в центральный рычаг лемнискатного механизма; 21 – демпфер гашения поперечных колебаний кузова

3.3 Моделирование компонентов объекта исследования

3.3.1 Кузов и тележка

Анализ методом многотельного моделирования динамики (англ. Multibody simulation) не требует высокой детализации, поэтому модель подвижного состава представляет собой недоопределённую сборку с упрощённой геометрией, т.е. предусматривающую возможность взаимного перемещения компонентов. Кузов вагона смоделирован в виде жёсткой балки, обладающей массово-инерционными характеристиками кузова вагона. Рама тележки выполнена в виде упрощённой жёсткой рамы с массово-инерционными характеристиками и геометрическим расположением элементов кинематических пар, соответствующими моделируемой реальной тележке. Рычаги подвески и наддрессорная балка выполнены в виде отдельных звеньев, кинематически связанных

с рамой тележки. Здесь и далее, если не указано обратное, кинематические пары моделируются с помощью сопряжений (англ. mates).

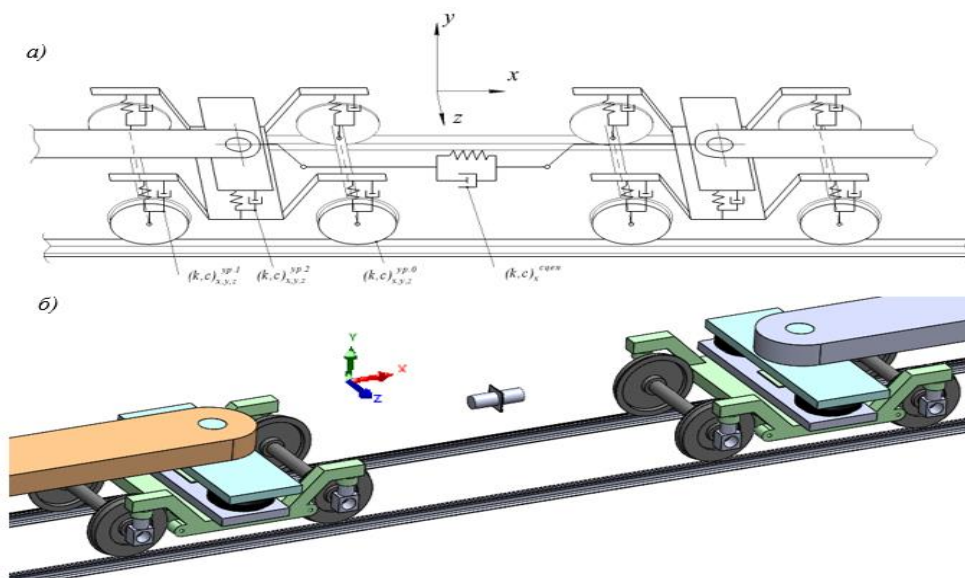


Рисунок 3.4 – Расчетная модель:
а) кинематическая схема модели; б) общий вид модели

3.3.2 Первичная подвеска

Первый уровень подвески определяет колебательные характеристики системы, образованной колёсной парой (отдельное звено, кинематически связанное с двумя рычагами подвески) и рамой тележки. Пружины и демпферы первичной подвески, смоделированы с помощью анизотропных втулок (англ. bushings). Жёсткость и коэффициент демпфирования по главным осям приведены в таблице 3.1.

3.3.3 Вторичная подвеска

Второй уровень подвески определяет колебательные характеристики системы, образованной рамой тележки и надрессорной балкой, кинематически связанной с кузовом. Пневмобаллоны и демпферы вторичной подвески моделируются аналогично, с помощью втулок, учитывающих разные характеристики жёсткости и демпфирования по ортогональным осям. Параметры моделирования также приведены в таблице 3.1.

3.3.4 Силы и связи

Настоящая модель учитывает упругий контакт колеса и рельса, который моделируется с помощью элемента «твёрдотельный контакт», подразумеваю-

ший определение столкновений элементов с вычислением величины взаимного проникновения поверхностей на основе свойств упругости и определением вектора силы реакции. Сила реакции вычисляется по формуле:

$$F_p = k \cdot g^e + \text{step}(g, d_0, c_0, d_{\max}, c_{\max}) \frac{dg}{dt}, \quad (3.2)$$

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 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 согласно [69]. Ветровая нагрузка [57, 101] 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 вычислим как:

$$F_{\text{ветр}} \approx 0,5\rho V_{\text{ветр}}^2 S_6, \quad (3.3)$$

где $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха, $V_{\text{ветр}}$ – скорость ветра, S_6 – площадь борта вагона.

Таблица 3.1 – Параметры модели

Параметр	Значение
Масса кузова:	25400 кг
Масса тележки:	2500 кг
Расстояние между центрами тележек	18 м
Расстояние между осями тележки	2,6 м
Площадь борта	13,29 м ²
Амплитуда возмущающей силы	17500 Н
Частота возмущающей силы	1 Гц
Ветровая нагрузка на борт	24558 Н
Жёсткость первичной подвески на буксу, Y	4000 Н/мм
Жёсткость первичной подвески на буксу, X, Z	5000 Н/мм
Коэффициент демпфирования первичной подвески	20 Н·с/мм
Жёсткость баллона вторичной подвески, Y	880 Н/мм
Жёсткость баллона вторичной подвески, X, Z	78 Н/мм
Коэффициент демпфирования вторичной подвески	64 Н·с/мм
Осевая жёсткость сцепки	100 кН/мм
Коэффициент демпфирования сцепки	1000 Нс/мм
Коэффициент динамического трения в паре колесо-рельс	0,05
Жёсткость в точке контакта в паре колесо-рельс	100 кН/мм
Максимальный коэффициент демпфирования в паре колесо-рельс	49,9 Н·с/мм

3.4. Моделирование движения высокоскоростного подвижного состава

Настоящая модель рассматривает движение состава из 5 вагонов в установившемся режиме со скоростью 350 км/ч. Начальная дискрета по времени $\Delta t = 0,02 \text{ с}$, точность вычислений 0,0001. Моделирование движения производится на основе методов Лагранжевой механики с помощью решающей программы Solidworks Motion, которая является форком MCS ADAMS, признанной сообществом конструкторов лучшей на рынке программной системой, предназначенной для виртуального моделирования сложных машин и механизмов. SolidWorks Motion ориентирована на инженеров-практиков, а не на специалистов по численным методам, поэтому не предоставляет управления некоторыми параметрами и методами симуляции, принимая их по умолчанию.

Согласно описанным выше параметрам модели и исходным данным состояния системы программа генерирует систему связанных дифференциаль-

ных и алгебраических уравнений, которая решается для каждого момента времени методом Гира [70-72]. Алгоритм работы решающей программы представлен на рисунке 3.5.

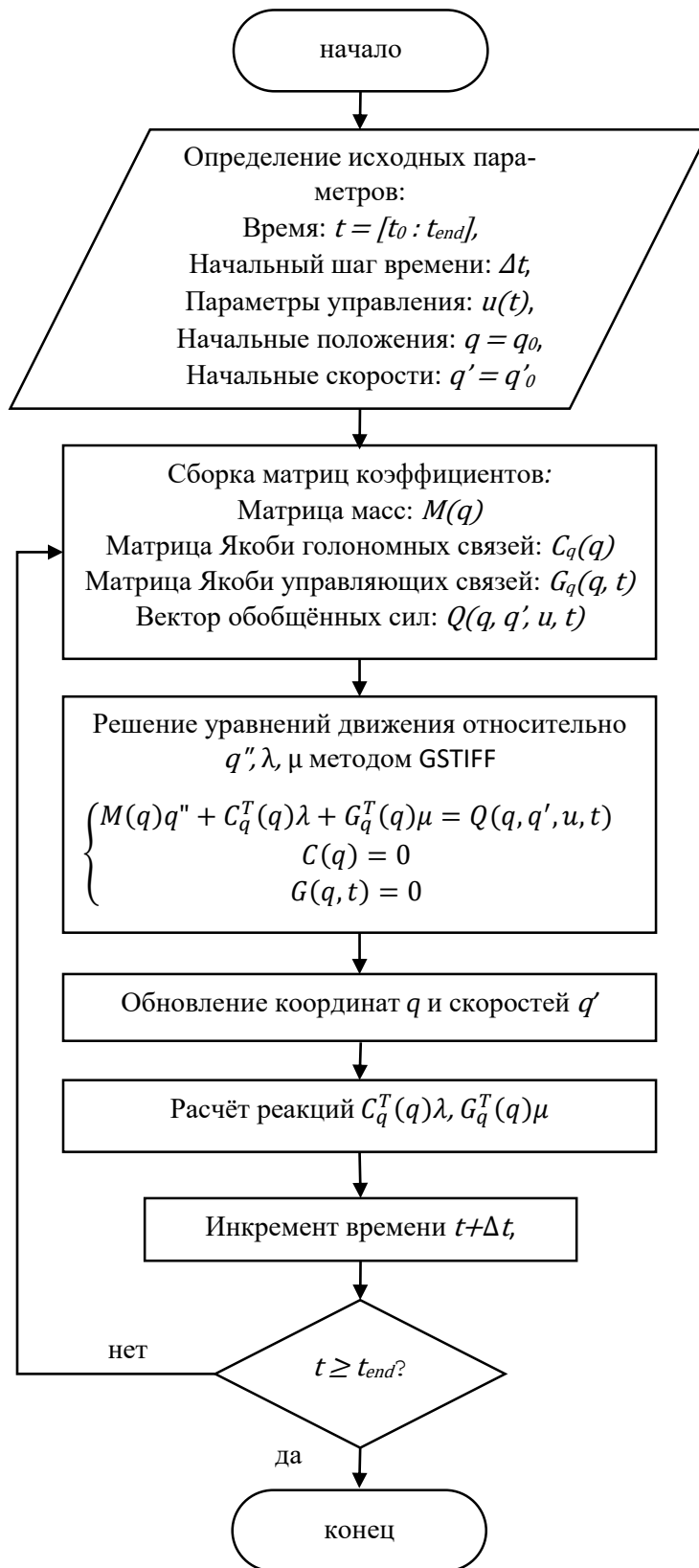


Рисунок 3.5 – Алгоритм работы решающей программы методом *MBS*

$G(q,t)$ – r управляющих связей (например, заданная траектория движения первого вагона),

$G_q(q,t)$ – матрица Якоби для $G(q,t)$,

μ – множители Лагранжа для управляющих связей.

Матрица Якоби $C_q(q) G_q(q,t)$ преобразует реакции связей (λ, μ) в обобщённые силы, действующие в направлениях, запрещённых связями. Например, для шарнира она "проецирует" силы реакций на оси относительного движения.

Рассмотрим вагон подвижного состава. Модель вагона имеет 31 степень свободы. Вектор обобщённых координат для одного вагона будет иметь вид

$$q = \left\{ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc} x_{\text{куз}} & y_{\text{куз}} & z_{\text{куз}} & \theta_{\text{куз}X} & \theta_{\text{куз}Y} & \theta_{\text{куз}Z} & y_{\text{тел1}} & z_{\text{тел1}} & \theta_{\text{тел1}X} & \theta_{\text{тел1}Y} & \theta_{\text{тел1}Z} & \dots & \\ & y_{\text{тел2}} & z_{\text{тел2}} & \theta_{\text{тел2}X} & \theta_{\text{тел2}Y} & \theta_{\text{тел2}Z} & y_{\text{кп1}} & z_{\text{кп1}} & \theta_{\text{кп1}X} & \theta_{\text{кп1}Y} & \dots & & \\ y_{\text{кп2}} & z_{\text{кп2}} & \theta_{\text{кп2}X} & \theta_{\text{кп2}Y} & y_{\text{кп3}} & z_{\text{кп3}} & \theta_{\text{кп3}X} & \theta_{\text{кп3}Y} & y_{\text{кп4}} & z_{\text{кп4}} & \theta_{\text{кп4}X} & \theta_{\text{кп4}Y} & \dots & \end{array} \right\},$$

где x, y, z – перемещения по ортогональным осям, $\theta_{X,Y,Z}$ – угловые перемещения вокруг соответствующих осей, индексом куз отмечены параметры кузова вагона, тел1,2 – передней и задней тележек соответственно, кп1,2,3,4 – соответствующих колёсных пар.

Таким образом, можно записать уравнения движения для каждого компонента модели, раскрыв физический смысл $C_q^T(q)\lambda$ и $G_q^T(q)\mu$. Уравнения движения i колёсной пары примут вид:

- для вертикального перемещения КП:

$$m_{\text{кп}} \ddot{y}_{\text{кп}i} = \sum_y \vec{F}_{\text{кур}0} + \sum_y \vec{F}_{\text{сур}0} + \sum_y \vec{F}_{\text{кур}1} + \sum_y \vec{F}_{\text{сур}1} + \vec{G}_{\text{кп}},$$

где $\sum_y \vec{F}_{\text{кур}1}$ – сумма вертикальных составляющих упругих сил в первичной подвеске для левого и правого колеса рассматриваемой КП,

$\sum_y \vec{F}_{\text{сур}1}$ – сумма вертикальных составляющих диссипативных сил в первичной подвеске для левого и правого колеса рассматриваемой КП,

$\vec{G}_{\text{кп}}$ – вес колёсной пары,

$\sum_y \vec{F}_{\text{кур}0}$ – сумма вертикальных составляющих упругих контактных сил пары колесо-рельс левого и правого колеса рассматриваемой КП;

$\sum_y \vec{F}_{\text{суп}0}$ – сумма вертикальных составляющих диссипативных контактных сил пары колесо-рельс левого и правого колеса рассматриваемой КП;

- для поворота КП вокруг оси X (поперечного поворота):

$$I_{\text{КП}X} \ddot{\theta}_{\text{КП}iX} = \sum Mx(\vec{F}_{\text{суп}0}) + \sum Mx(\vec{F}_{\text{куп}0}) + \sum Mx(\vec{F}_{\text{суп}1}) + \sum Mx(\vec{F}_{\text{куп}1}),$$

где $\sum Mx(F_j)$ – суммы моментов контактных, упругих и диссипативных сил для правого и левого колеса рассматриваемой КП относительно оси X ,

$I_{\text{КП}X}$ – момент инерции КП относительно оси X ;

- для поворота КП вокруг оси Y (поворота в плане):

$$I_{\text{КП}Y} \ddot{\theta}_{\text{КП}iY} = \sum My(\vec{F}_{\text{суп}0}) + \sum My(\vec{F}_{\text{куп}0}) + \sum My(\vec{F}_{\text{суп}1}) + \sum My(\vec{F}_{\text{куп}1}) + \sum My(\vec{F}_{\text{тр}}),$$

где $\vec{F}_{\text{тр}}$ – силы трения в контактной паре колесо-рельс для правого и левого колеса рассматриваемой КП.

Уравнения движения рамы i тележки можно записать в виде:

- для вертикального движения:

$$m_{\text{тел}} \ddot{y}_{\text{тел}i} = \sum_y \vec{F}_{\text{куп}1} + \sum_y \vec{F}_{\text{суп}1} + \vec{G}_{\text{тел}} + \sum_y \vec{F}_{\text{куп}2} + \sum_y \vec{F}_{\text{суп}2},$$

где $\sum_y \vec{F}_{\text{куп}1, \text{суп}1}$ – суммы вертикальных составляющих упругих и диссипативных сил в первичной подвеске для левого и правого колеса каждой КП рассматриваемой тележки;

- для поперечного движения:

$$m_{\text{тел}} \ddot{z}_{\text{тел}i} = \sum_z \vec{F}_{\text{куп}1} + \sum_z \vec{F}_{\text{суп}1} + \sum_z \vec{F}_{\text{куп}2} + \sum_z \vec{F}_{\text{суп}2},$$

- для поперечного поворота (крен):

$$I_{\text{тел}X} \ddot{\theta}_{\text{тел}iX} = \sum Mx(\vec{F}_{\text{суп}1}) + \sum Mx(\vec{F}_{\text{куп}1}) + \sum Mx(\vec{F}_{\text{суп}2}) + \sum Mx(\vec{F}_{\text{куп}2}),$$

- для продольного поворота (тангаж):

$$I_{\text{тел}Z} \ddot{\theta}_{\text{тел}iZ} = \sum Mz(\vec{F}_{\text{суп}1}) + \sum Mz(\vec{F}_{\text{куп}1}) + \sum Mz(\vec{F}_{\text{суп}2}) + \sum Mz(\vec{F}_{\text{куп}2}),$$

- для вертикального поворота (рыскание):

$$I_{\text{тел}Y} \ddot{\theta}_{\text{тел}iY} = \sum My(\vec{F}_{\text{суп}1}) + \sum My(\vec{F}_{\text{куп}1}) + \sum My(\vec{F}_{\text{суп}2}) + \sum My(\vec{F}_{\text{куп}2}),$$

Наконец, уравнения движения i кузова можно записать в виде:

- для движения вдоль оси:

$$m_{\text{куз}} \ddot{x}_{\text{куз}i} = \sum_x \vec{F}_{\text{Кур}2} + \sum_x \vec{F}_{\text{Сур}2} + \sum_x \vec{F}_{\text{Ксцеп}} + \sum_x \vec{F}_{\text{Ссцеп}},$$

где $\sum_x \vec{F}_{\text{Кур}2, \text{Сур}2}$ – суммы осевых составляющих упругих и диссипативных сил вторичной подвески для передней и задней тележек рассматриваемого вагона;

$\sum_x \vec{F}_{\text{Ксцеп}, \text{Ссцеп}}$ – суммы осевых составляющих упругих и диссипативных сил сцепных устройств $i - 1$ и $i + 1$ вагонов;

- для поперечного движения:

$$m_{\text{куз}} \ddot{z}_{\text{куз}i} = \sum_z \vec{F}_{\text{Кур}2} + \sum_z \vec{F}_{\text{Сур}2} + \vec{F}_{\text{ветр}},$$

где $\vec{F}_{\text{ветр}}$ – приведённая ветровая нагрузка на борт;

- для вертикального движения:

$$m_{\text{куз}} \ddot{y}_{\text{куз}i} = \sum_z \vec{F}_{\text{Кур}2} + \sum_z \vec{F}_{\text{Сур}2} + \vec{F}_b,$$

где $\vec{F}_b$ – возмущающая сила, моделирующая колебания кузова в установившемся режиме движения;

- для поперечного поворота (крен):

$$I_{\text{куз}X} \ddot{\theta}_{\text{куз}iX} = \sum Mx(\vec{F}_{\text{Сур}2}) + \sum Mx(\vec{F}_{\text{Кур}2}) + Mx(\vec{F}_{\text{ветр}}),$$

- для продольного поворота (тангаж):

$$I_{\text{куз}Z} \ddot{\theta}_{\text{куз}iZ} = \sum Mz(\vec{F}_{\text{Сур}2}) + \sum Mz(\vec{F}_{\text{Кур}2}) + \sum My(\vec{F}_{\text{Ссцеп}}) + \sum My(\vec{F}_{\text{Ксцеп}}),$$

- для вертикального поворота (рыскание):

$$I_{\text{куз}Y} \ddot{\theta}_{\text{куз}iY} = \sum My(\vec{F}_{\text{Сур}2}) + \sum My(\vec{F}_{\text{Кур}2}) + \sum My(\vec{F}_{\text{Ссцеп}}) + \sum My(\vec{F}_{\text{Ксцеп}}).$$

3.5. Результаты моделирования движения высокоскоростного подвижного состава

В результате расчёта получены ортогональные составляющие вектора силы контактного взаимодействия колеса и рельса для каждой колёсной пары состава из 5 вагонов, движущегося со скоростью 350 км/ч. На рисунке рис. 3.6. показаны графики для первой колёсной пары первой тележки второго вагона. Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы:

Вертикальная составляющая Q_y характеризует основную динамическую нагрузку от колеса на рельс. Под действием ветровой нагрузки наблюдается разгрузка колёс с наветренной стороны. Амплитуда колебаний, вызванных воздействием возмущающей силы, зависит от жёсткости подвески вагона и неровностей пути. При прохождении искусственных сооружений, обладающих меньшей жёсткостью по сравнению с основными участками пути (например, мостов и эстакад), колебания могут приводить к непредвиденным явлениям, в том числе к возникновению механического резонанса. Данный аспект исследуется в следующем разделе настоящей главы.

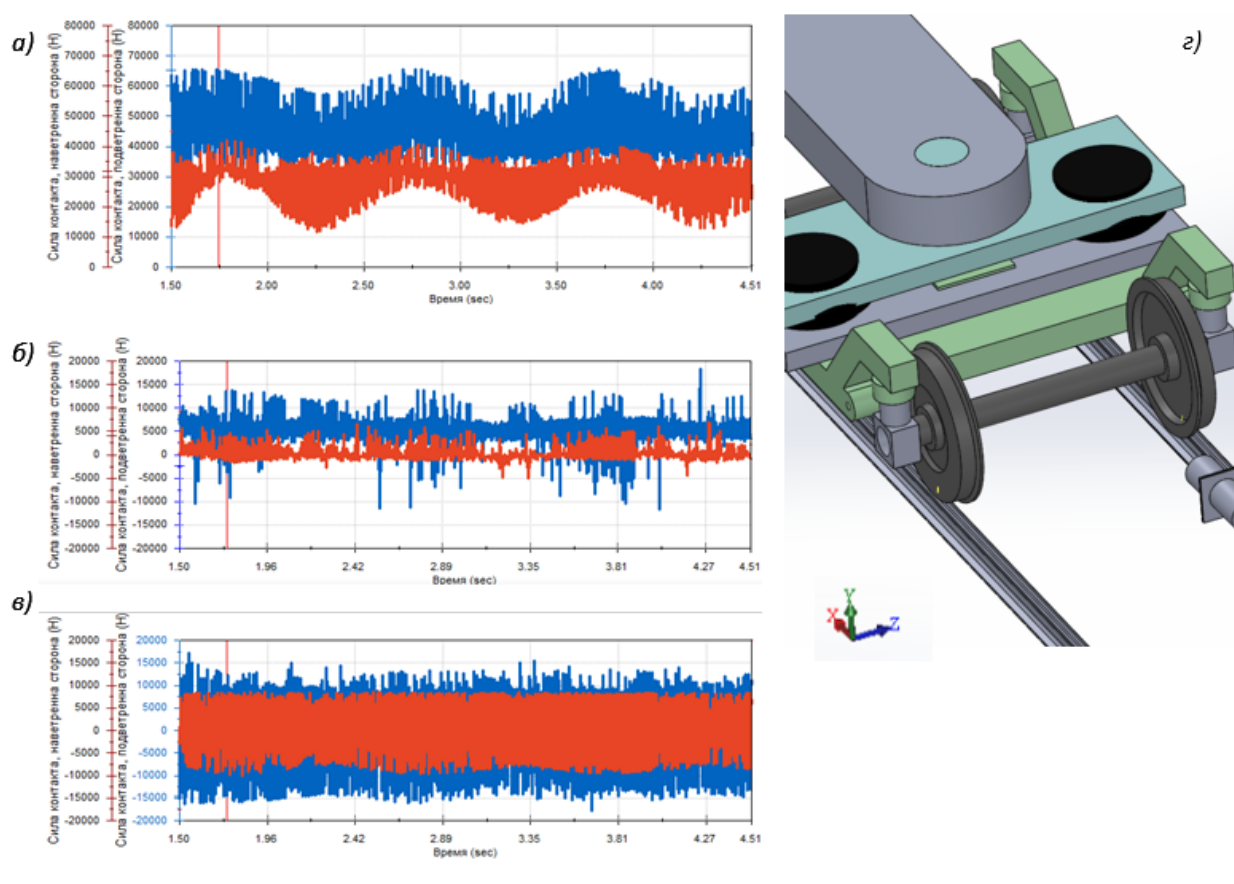


Рисунок 3.6 – Составляющие силы контактного взаимодействия колеса и рельса (1 колесная пара 1 тележки 2 вагона): а) вертикальная составляющая Q_y , б) поперечная составляющая Q_z , в) продольная составляющая Q_x , г) вид модели и ориентация осей координат

Продольная составляющая Q_x связана с силами трения и ускорениями колеса на участках разгона, торможения или прохождения кривых участков пути. В данном эксперименте рассматривается равномерное движение в уста-

новившемся режиме, таким образом, значительная величина данной составляющей обусловлена явлением юза тележек вследствие совместного действия сил трения, упругого взаимодействия кузовов через сцепные устройства, и перекоса кузова под действием ветровой нагрузки (и как следствие – изменение проекции вектора возмущающей силы на ось пути).

Поперечная составляющая (Q_z) отражает боковое воздействие колеса на рельс. Данная составляющая имеет наибольшее значение при прохождении кривых, но поскольку в рассматриваемом случае имеет место движение по прямому участку, продольная составляющая силы контакта преобладает над поперечной. Данная составляющая может быть использована для оценки поперечной устойчивости экипажа и износа гребней колёс.

Таким образом, полученные данные демонстрируют высокую динамическую активность системы на скорости 350 км/ч, что подтверждает необходимость учёта контактных сил в последующих расчётах. Полученные результаты имеют ключевое значение для последующих этапов исследования, рассмотренных в главе 4.

В задаче линейной динамики рассматриваются совместные колебания системы, состоящей из поезда и моста, под действием найденных в ходе решения текущей задачи векторов сил. Рассчитанные силы будут использованы в качестве входного воздействия при анализе вынужденных колебаний моста. Особый интерес представляют резонансные режимы, которые могут возникать при определённых скоростях движения.

В задаче многофакторного анализа движения учитывается совместное влияние контактных сил, рассчитанных в ходе данного исследования, аэродинамических нагрузок, определённых в главе 2, и колебаний механической системы, состоящей из пути, мостовой конструкции и проходящего подвижного состава. Данный подход позволит оценить уровень вибрации, передаваемой через опоры моста в грунт и динамическую устойчивость состава при экстремальных внешних воздействиях.

Выводы по главе 3

1. Разработана математическая модель ходовой части высокоскоростного подвижного состава, позволяющая учитывать упругие связи между элементами кузова и тележки, а также более полно учитывать ее упругие и демпфирующие свойства в продольном, поперечном и вертикальном направлениях.
2. Выполнено имитационное моделирование движения высокоскоростного подвижного состава из 5 вагонов в установившемся режиме со скоростью 350 км/ч с учетом ветровой нагрузки от бокового ветра.
3. 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 по податливой опорной поверхности с учетом дополнительной ветровой нагрузки, а также резонансных явлений.
4. Показана необходимость учета в задаче многофакторного анализа движения совместного влияния контактных сил, аэродинамических нагрузок, и колебаний механической системы, состоящей из пути, мостовой конструкции и проходящего подвижного состава, что позволяет выполнить оценку уровня вибрации, передаваемой через опоры моста в грунт и динамическую устойчивость состава при экстремальных внешних воздействиях.
5. Рекомендуется разработать и внедрить высоко детализированные цифровые двойники (ЦД) высокоскоростного подвижного состава эксплуатируемого подвижного состава для углублённого инженерного анализа и проведения комплексных компьютерных экспериментов средствами CAE в рамках проектирования и оценки объектов железнодорожной инфраструктуры.
6. Внедрение ЦД позволит перейти к проактивному подходу в проектировании высокоскоростного подвижного состава и железнодорожной инфраструктуры: заранее выявлять и устранять риски, создавая более безопасные, энергоэффективные и надёжные транспортные системы, адаптированные к конкретным условиям эксплуатации.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И ПРИБЛИЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПЕРИФЕРИИ

4.1. Методика проведения натурных испытаний динамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава при прохождений мостовых сооружений

Ради получения исходных данных частоты вибрации были проведены натурные испытания. Они позволяют воспроизвести эксперимент в реальных условиях и проверить теоретические данные. Основной проблемой натурных испытаний является невозможность точно воспроизвести условия их проведения повторно [73- 77]. В сравнении с лабораторными и численными экспериментами они являются как правило более дорогостоящими.

Испытания проводились на линии Москва – Санкт-Петербург в кабине поезда Velaro RUS («Сапсан») 21 мая 2025 года с отправлением из Санкт-Петербурга в Москву №759 в 9:00 с прибытием в 13:20, обратно из Москвы в Санкт-Петербург №772 в 15:30 с прибытием в 19:27.

Параметры среды: Для определения рабочих характеристик средства измерений установлены следующие условия окружающей среды по ГОСТ ИСО 8041-2006: температура воздуха – 23 °С и относительная влажность – 50 %.

Цель исследования: провести натуральные исследования с определением амплитудно-частотных характеристик вибрации, на которых сосредоточена основная энергия колебаний системы поезд – путь – мост, действующих на кузова головного и хвостового вагонов поезда Velaro RUS («Сапсан»), при движении по мосту для валидации разработанной компьютерной модели.

Основные задачи исследования:

- выполнить вибропортретирование путем установления датчиков измерений в габаритах мостового сооружения;
- интерпретировать полученные результаты.

Для проведения испытаний использовалась стандартная измерительная аппаратура:

- микромеханический акселерометр (Акселерометр 1A206HA-200(T));

- ноутбук;
- оригинальное специализированное ПО – Unit 17v;
- термогигрометр ИВА-6.

Описание прибора: 1A206HA-200(T) – многокристальный модуль (МСМ), состоящий из нескольких матриц, на одной из которых находится 3-осевой акселерометр со встроенным программным обеспечением для калибровки. Он оснащен тремя 16-разрядными аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) в том числе для оцифровки выходных данных акселерометра. Для точного отслеживания как быстрых, так и медленных движений объектов, прибор оснащен программируемым пользователем акселерометром с полномасштабным диапазоном $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ и $\pm 16g$.

В трехосевом акселерометре 1A206HA-200(T) используются отдельные контрольные массы для каждой оси.

Методика проведения исследования приведена на рисунке 4.1.

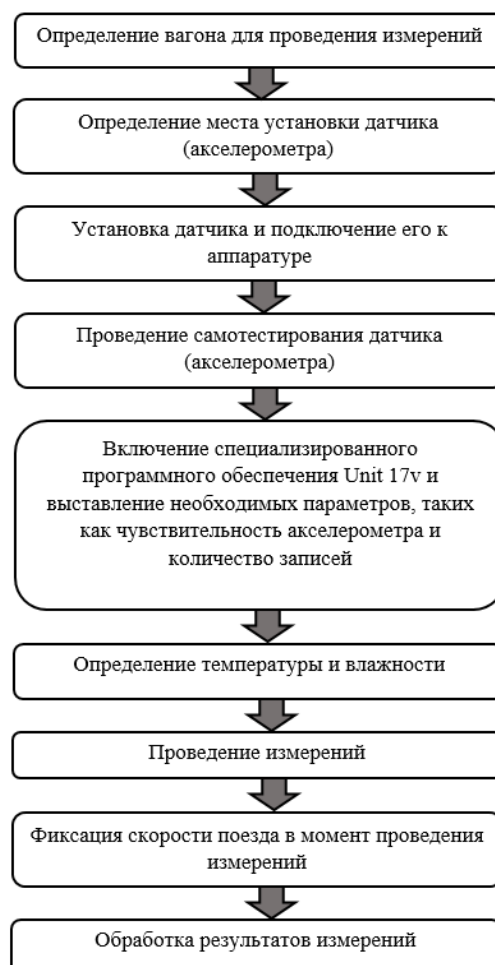


Рисунок 4.1 – Методика проведения исследования

В соответствии с установленной методикой были проведены натурные исследования. Для этого датчик установили в активной кабине машиниста десятого вагона во время следования поезда по маршруту Санкт-Петербург - Москва в связи с тем, что при заходе поезда на мост формируется объемные зоны повышенного давления, а в обратном направлении был установлен в хвостовой / свободной кабине машиниста также в десятом вагоне из-за формирования пониженного давления в хвостовой части поезда (рис. 4.2, 4.3)



Рисунок 4.2 – Место расположения датчика



Рисунок 4.3 – Кабина машиниста: 1 – кресло машиниста; 2 – дисплейный модуль устройства безопасности КЛУБ-У; 3 – основание кресла машиниста; 4 – место расположения ноутбука

Датчик измерения вибрации должен располагаться как можно ближе к узлу подвеса ходовой части (рис. 4.2). В соответствии с ГОСТ 31319-2006 датчик был установлен на основание кресла машиниста. Крепление датчика к поверхности основания осуществили с помощью магнита, сила притяжения которого составила не менее 1 кН, на поверхность без дефектов. Направление осей датчика сориентировали следующим образом: X – вдоль оси рельса (т.е. по ходу движения), Y – перпендикулярно оси рельса, Z – вертикально оси рельса. После установки датчика, подключили его к ноутбуку и запустили специализированную программу Unit 17v (рис. 4.3). Выставили необходимые параметры.



Рисунок 4.3 – Подключение датчика и выставление необходимых параметров

Перед началом исследований определили внешние и внутренние воздействия окружающей среды:

- 1) Внешние: температура воздуха 15-18 °С, относительная влажность воздуха 37-41 %.
- 2) Внутренние: температура воздуха 22 °С, относительная влажность воздуха 30-35 %.

Скорость движения поезда определяли по дисплейному модулю устройства безопасности КЛУБ-У.

Процесс измерения запускали непосредственно перед заходом поезда на основание металлических конструкций моста и завершали после их прохождения.

При обработке результатов измерений по направлению движения Санкт-Петербург – Москва по каждой из осей X, Y, Z были определены основные параметры выборок. Результаты приведены в таблице 4.1 и рис. 4.4.

Таблица 4.1 – Результаты измерений

Ось Z	Результаты	Ось X	Результаты	Ось Y	Результаты
Среднее	250,68	Среднее	-12,07	Среднее	-9,79
Стандартная ошибка	0,47	Стандартная ошибка	0,37	Стандартная ошибка	0,42
Медиана	252	Медиана	-12	Медиана	-8
Мода	248	Мода	-12	Мода	-8
Стандартное отклонение	33,18	Стандартное отклонение	26,09	Стандартное отклонение	29,43
Дисперсия выборки	1100,77	Дисперсия выборки	680,51	Дисперсия выборки	866,24
Эксцесс	10,40	Эксцесс	8,84	Эксцесс	11,13
Асимметричность	-0,19	Асимметричность	-0,16	Асимметричность	-0,12
Интервал	452	Интервал	324	Интервал	372
Минимум	8	Минимум	-180	Минимум	-200
Максимум	460	Максимум	144	Максимум	172
Количество наблюдений	5001	Количество наблюдений	5001	Количество наблюдений	5001
Наибольший	460	Наибольший	144	Наибольший	172
Наименьший	8	Наименьший	-180	Наименьший	-200
Уровень надежности (95,0 %)	0,92	Уровень надежности (95,0 %)	0,73	Уровень надежности (95,0 %)	0,82

На основании данных таблицы выявлены:

Для оси X:

Среднее значение совпадает с медианой и модой и равно -12. Эксцесс приблизительно составляет 9. Асимметричность практически равна 0. Наименьшее значение составляет 8, а наибольшее – 460. Размах выборки/Амплитуда составляет 452. Данные результаты позволяют выдвинуть гипотезу о нормальном распределении результатов измерения.

Для оси Y:

Среднее значение равно -10, практически совпадает с медианой и модой, принимающих значения равные -8. Эксцесс составляет 11. Асимметричность практически равна 0. Наименьшее значение составляет -200, а наибольшее –

172. Размах выборки/Амплитуда составляет 452. Данные результаты позволяют выдвинуть гипотезу о нормальном распределении результатов измерения.

Для оси Z:

Среднее значение составило 251, что совпадает частично с значениями медианы 252 и моды 248. Эксцесс приблизительно составляет 10. Асимметричность практически равна 0. Наименьшее значение составляет -180, а наибольшее – 144. Размах выборки/Амплитуда составляет 452. Данные результаты позволяют выдвинуть гипотезу о нормальном распределении результатов измерения.

Анализ в парах XY, XZ, YZ показал следующие результаты:

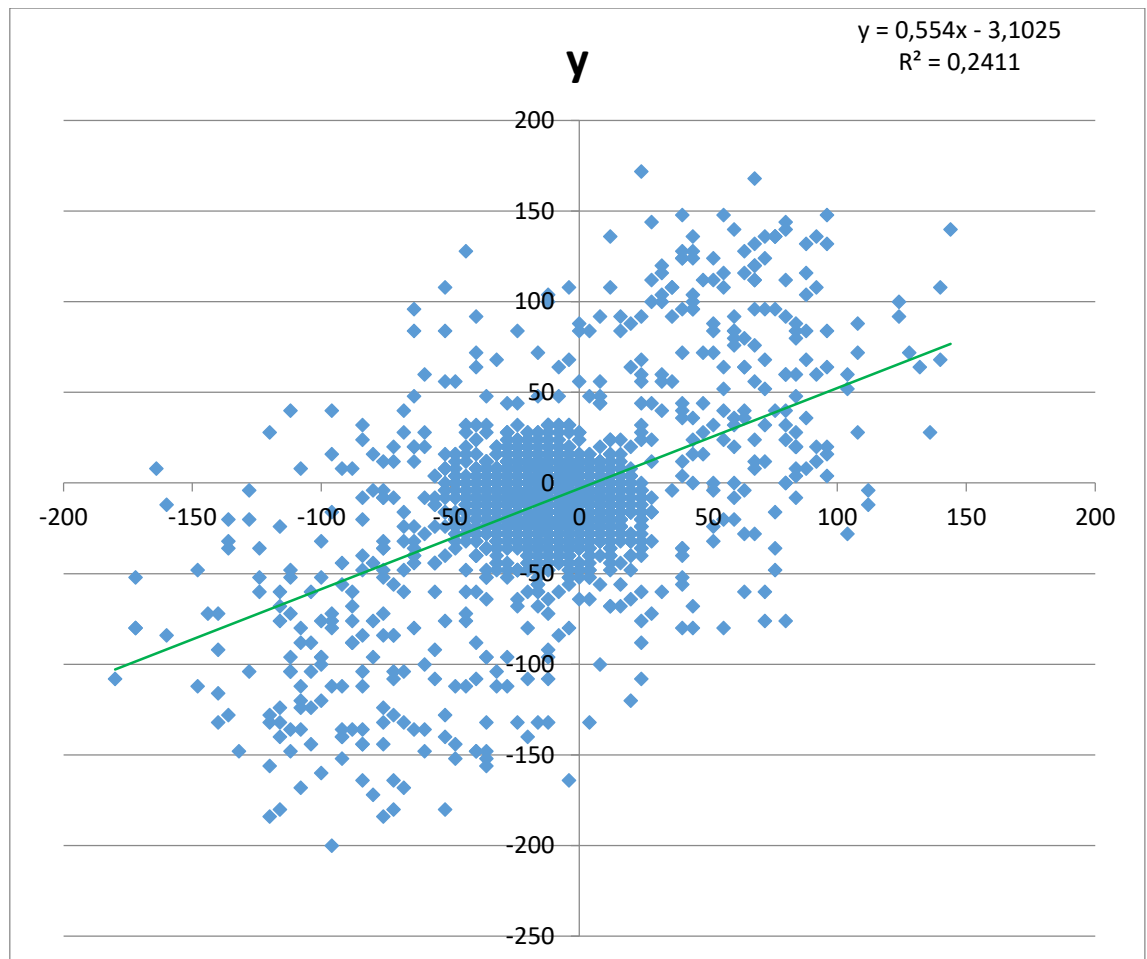
В паре YZ при увеличении вибрации по оси Y, наблюдается снижение вибрации по оси Z коэффициент корреляции составил -0,46.

В паре XZ между показателями оси X и Z линейной зависимости не выявлено, коэффициент корреляции составил 0,1.

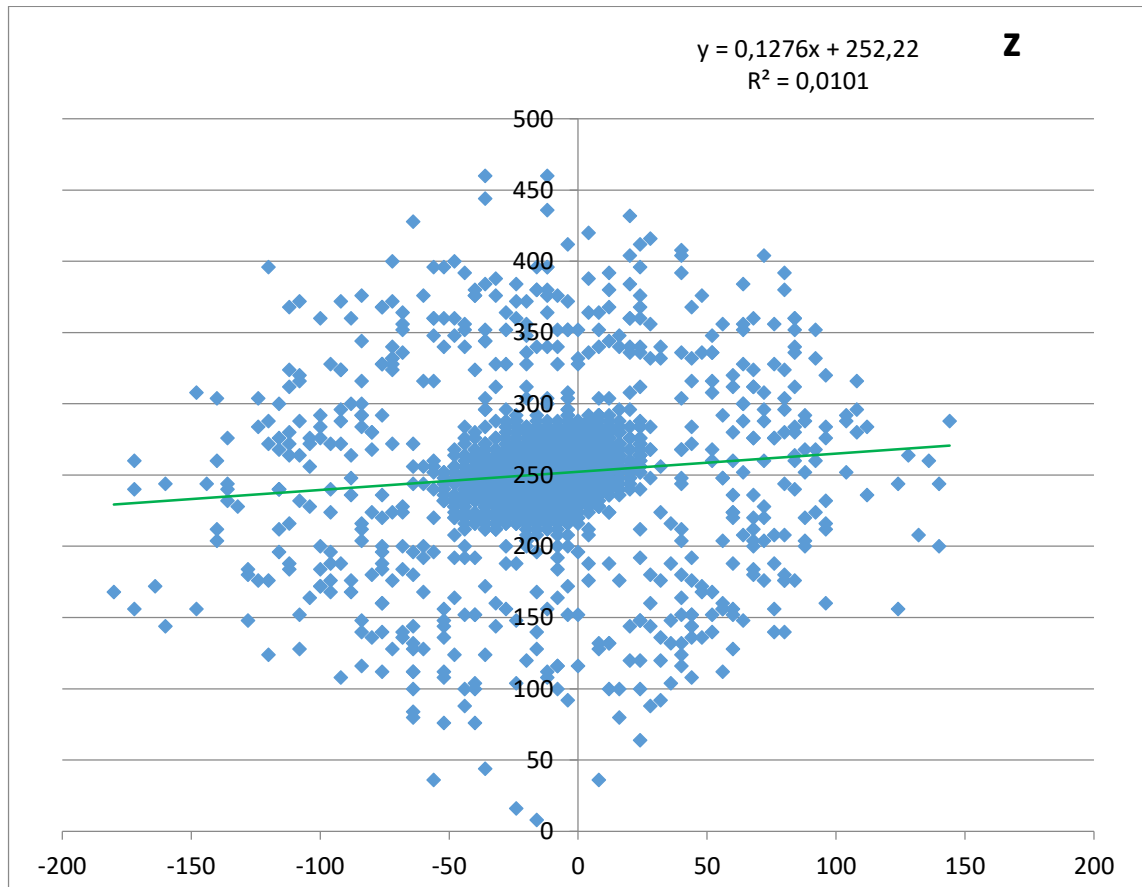
В паре XY между показателями X и Y значения показателя коэффициента корреляции составило 0,49, что говорит о том, что при увеличении вибрации по оси X в среднем увеличивается вибрация по оси Y.

В целом с учетом того, что корреляция между X и Z составляет 0,1 можно предположить, что линейная функциональная зависимость между показателями по осям XYZ отсутствует.

a)



b)



в)

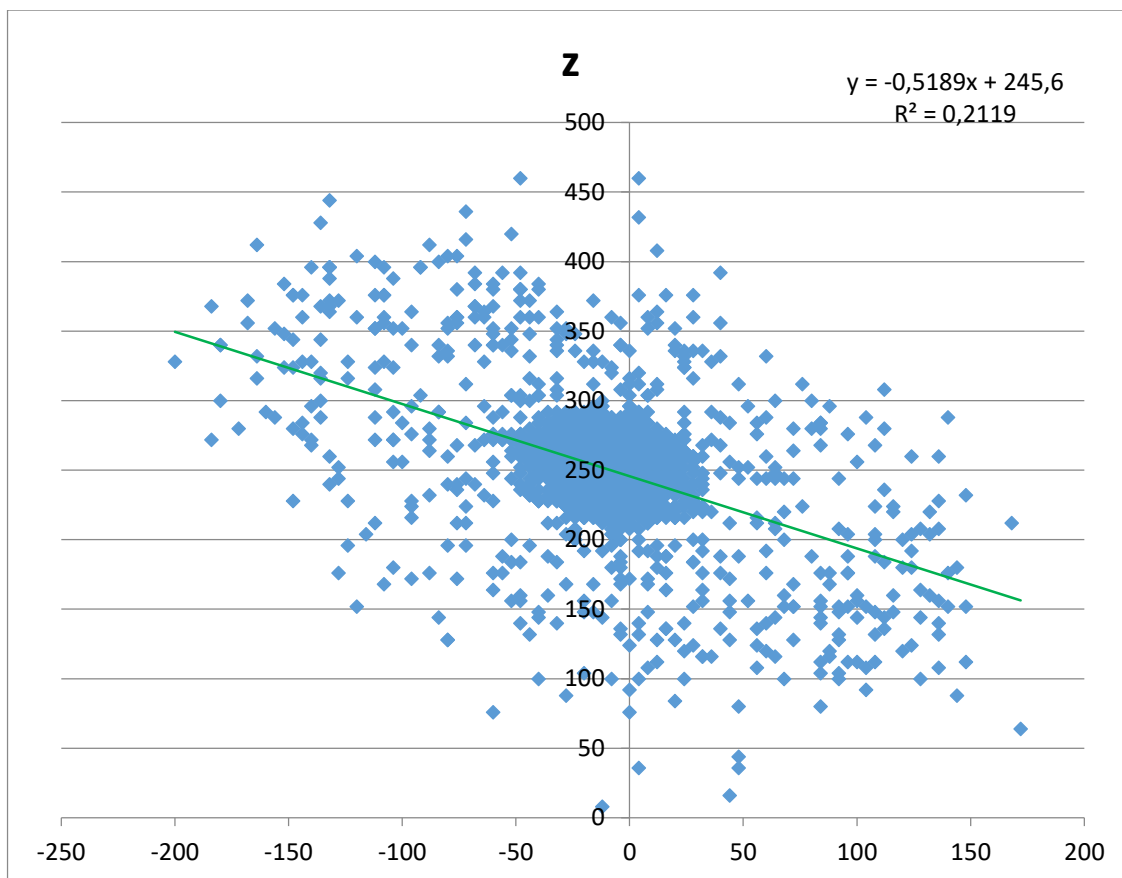


Рисунок 4.4 – Результаты измерений: а – ХУ, б – ХZ, в – YZ

Кроме того, следует обратить внимание на следующее:

Колебания в паре ХZ по оси Х в основном сконцентрировано в интервале от -50 до 30 при Z от 200 до 300. При увеличении колебаний по ходу движения (Х) происходит незначительные колебания по вертикали (Z), т.е. изменения колебаний по ходу движения незначительны, так как коэффициент детерминации равен 0,15.

В паре ХУ основное облако данных по оси Х лежит в интервале от -50 до 30, по оси Y от 0 до 40. При увеличении колебаний по ходу движения поезда происходит увеличение боковых колебаний (Y).

В паре YZ Y в основном находится в границах от -50 до 40, а по Z от 200 до 300. При увеличении колебаний по Y происходит уменьшение по Z.

Таким образом при увеличении боковой вибрации происходит снижение вертикальных колебаний и головной вагон поезда приземляется при съезде с мостовой конструкции, в тоже время при заезде на нее вагон приподнимается поскольку увеличиваются вертикальные колебания.

Регрессионный анализ

На основании обработки данных с помощью метода наименьших квадратов построена двухфакторная регрессионная модель зависимости Z от X и Y:
 $z=249,8713+0,546967x-0,757y$.

Регрессионная статистика представлена в таблицах 4.2-4.6.

Таблица 4.2 – Регрессионная статистика

Статистический показатель	Значения показателя
Множественный R	0,593525348
R-квадрат	0,352272339
Нормированный R-квадрат	0,352013144
Стандартная ошибка	26,70734701
Количество наблюдений	5001

Коэффициент детерминации R-квадрат составил 0,35, что объясняет изменения Z от X и Y на уровне 35 %, т.е. модель не описывает влияние факторов на Z на 65 %.

Таблица 4.3 – Дисперсионный анализ

	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	2	1938848,39	969424,19	1359,10	0
Остаток	4998	3564985,36	713,28		
Итого	5000	5503833,74			

Значимость F не превышает 0,05, соответственно можно сделать вывод о высокой степени достоверности результатов и наличия в исследовании закономерности.

Таблица 4.4 – Статистические показатели регрессионной модели

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95 %	Верхние 95 %
Y-пересечение	249,87	0,42	596,86	0	249,05	250,69
x	0,55	0,02	32,91	3,6948E-215	0,51	0,58
y	-0,76	0,01	-51,39	0	-0,79	-0,73

Поскольку P-Значение равно 0, то параметрам регрессии можно доверять.

Таблица 4.5 – Двухфакторный дисперсионный анализ без повторений

Итоги	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия
Z	5001	1253652	250,6803	1100,767
X	5001	-60364	-12,0704	680,507
Y	5001	-48960	-9,79004	866,2415

Таблица 4.6 – Дисперсионный анализ

Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Строки	2,28	2	1,14	129989,10	0	3,00
Столбцы	4460218	5000	892,04	1,02	0,25	1,04
Погрешность	8777358	10000	877,73			
Итого	2,41	15002				

При обработке результатов измерений по направлению движения Москва – Санкт-Петербург по каждой из осей X, Y, Z были также определены основные параметры выборок. Результаты приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Параметры выборок

Ось Z	Результаты	Ось X	Результаты	Ось Y	Результаты
Среднее	249,68	Среднее	-0,68	Среднее	24,33
Стандартная ошибка	0,20	Стандартная ошибка	0,15	Стандартная ошибка	0,20
Медиана	248	Медиана	0	Медиана	24
Мода	248	Мода	0	Мода	24
Стандартное отклонение	11,84	Стандартное отклонение	8,94	Стандартное отклонение	11,77
Дисперсия выборки	140,24	Дисперсия выборки	79,88	Дисперсия выборки	138,43
Эксцесс	2,38	Эксцесс	1,91	Эксцесс	0,11
Асимметричность	0,23	Асимметричность	0,11	Асимметричность	0,13
Интервал	164	Интервал	116	Интервал	100
Минимум	196	Минимум	-40	Минимум	-20
Максимум	360	Максимум	76	Максимум	80
Сумма	898832	Сумма	-2452	Сумма	87600
Количество наблюдений	3600	Количество наблюдений	3600	Количество наблюдений	3600
Наибольший	360	Наибольший	76	Наибольший	80
Наименьший	196	Наименьший	-40	Наименьший	-20
Уровень надежности (95,0 %)	0,39	Уровень надежности (95,0 %)	0,29	Уровень надежности (95,0 %)	0,38

На основании данных таблицы выявлены:

Для оси X:

Среднее значение совпадает с медианой и модой и равно -0,68. Эксцесс приблизительно составляет 1,9. Асимметричность практически равна 0. Наименьшее значение составляет -40, а наибольшее – 76. Размах выборки/Амплитуда составляет 116. Данные результаты позволяют выдвинуть гипотезу о нормальном распределении результатов измерения.

Для оси Y:

Среднее значение равно 24, совпадает с медианой и модой, принимающих такие же значения. Эксцесс и асимметричность практически равны 0. Наименьшее значение составляет -20, а наибольшее – 80. Размах выборки/Амплитуда составляет 100. Данные результаты позволяют выдвинуть гипотезу о нормальном распределении результатов измерения.

Для оси Z:

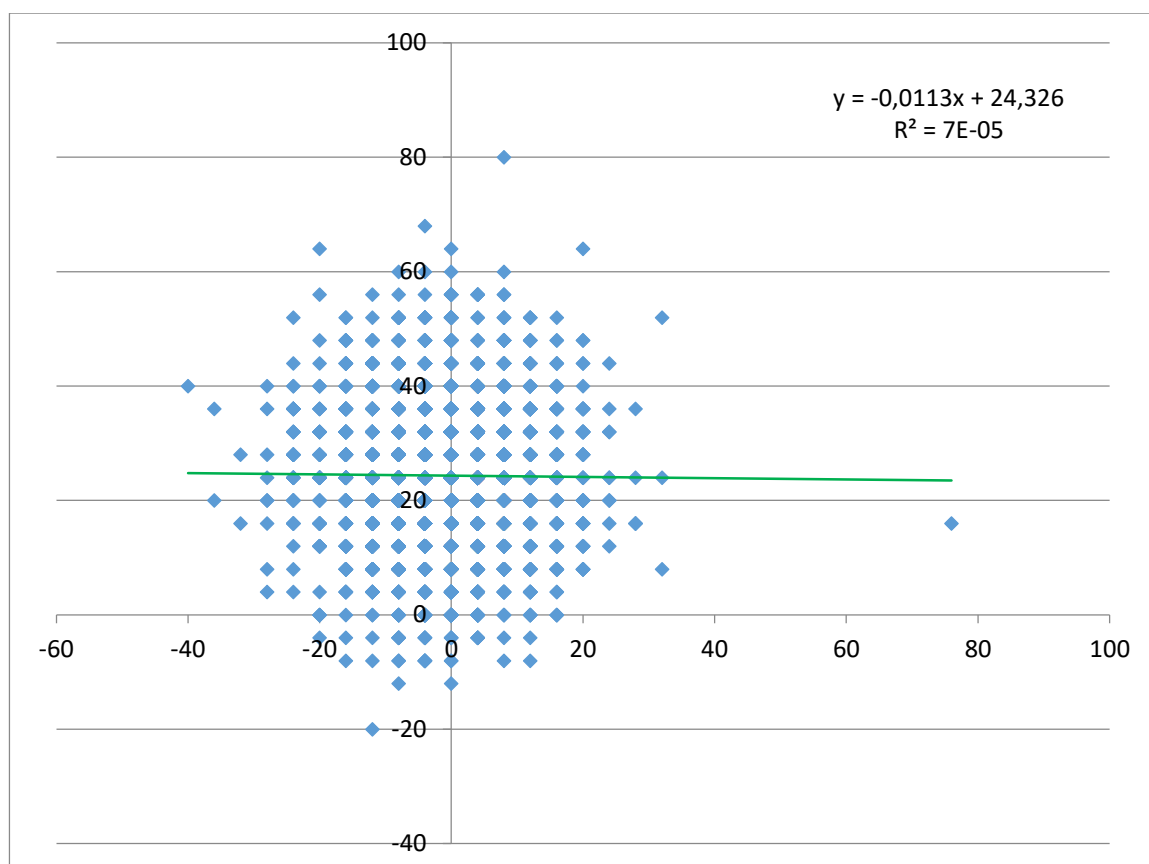
Среднее значение составило 250, что совпадает частично с значениями медианы и моды равными 248. Эксцесс приблизительно составляет 2. Асимметричность практически равна 0. Наименьшее значение составляет 196, а наибольшее – 360. Размах выборки/Амплитуда составляет 164. Данные результаты позволяют выдвинуть гипотезу о нормальном распределении результатов измерения.

Анализ в парах XY, XZ, YZ показал следующие результаты:

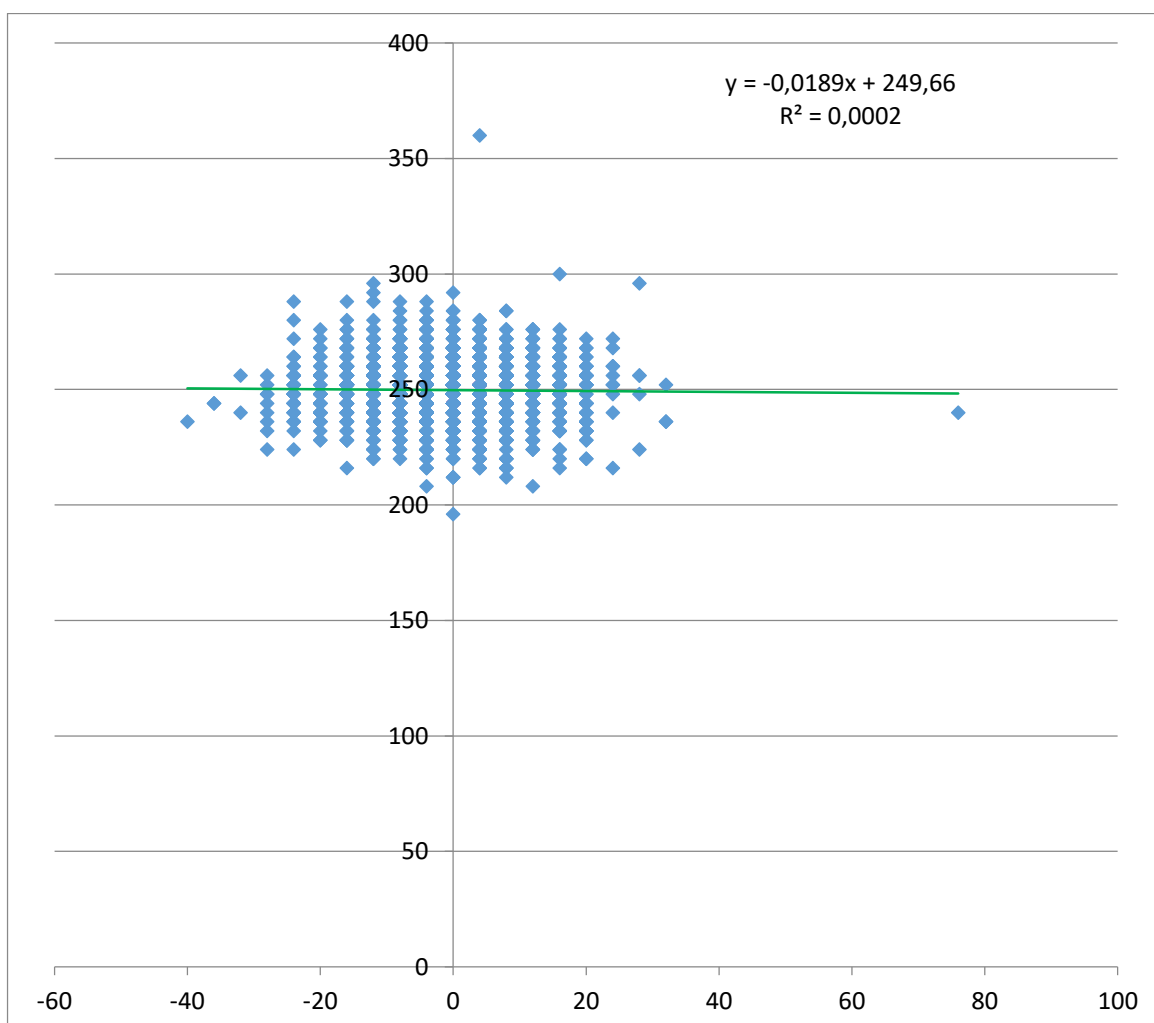
- В паре YZ при увеличении вибрации по оси Y, наблюдается снижение вибрации по оси Z коэффициент корреляции составил 0,04.
- В паре XZ между показателями оси X и Z линейной зависимости не выявлено, коэффициент корреляции составил -0,01.
- В паре XY между показателями X и Y значения показателя коэффициента корреляции составило -0,01, что говорит об отсутствии линейной зависимости.

В целом можно предположить, что линейная функциональная зависимость между показателями по осям XYZ отсутствует (рис. 4.5).

a)



b)



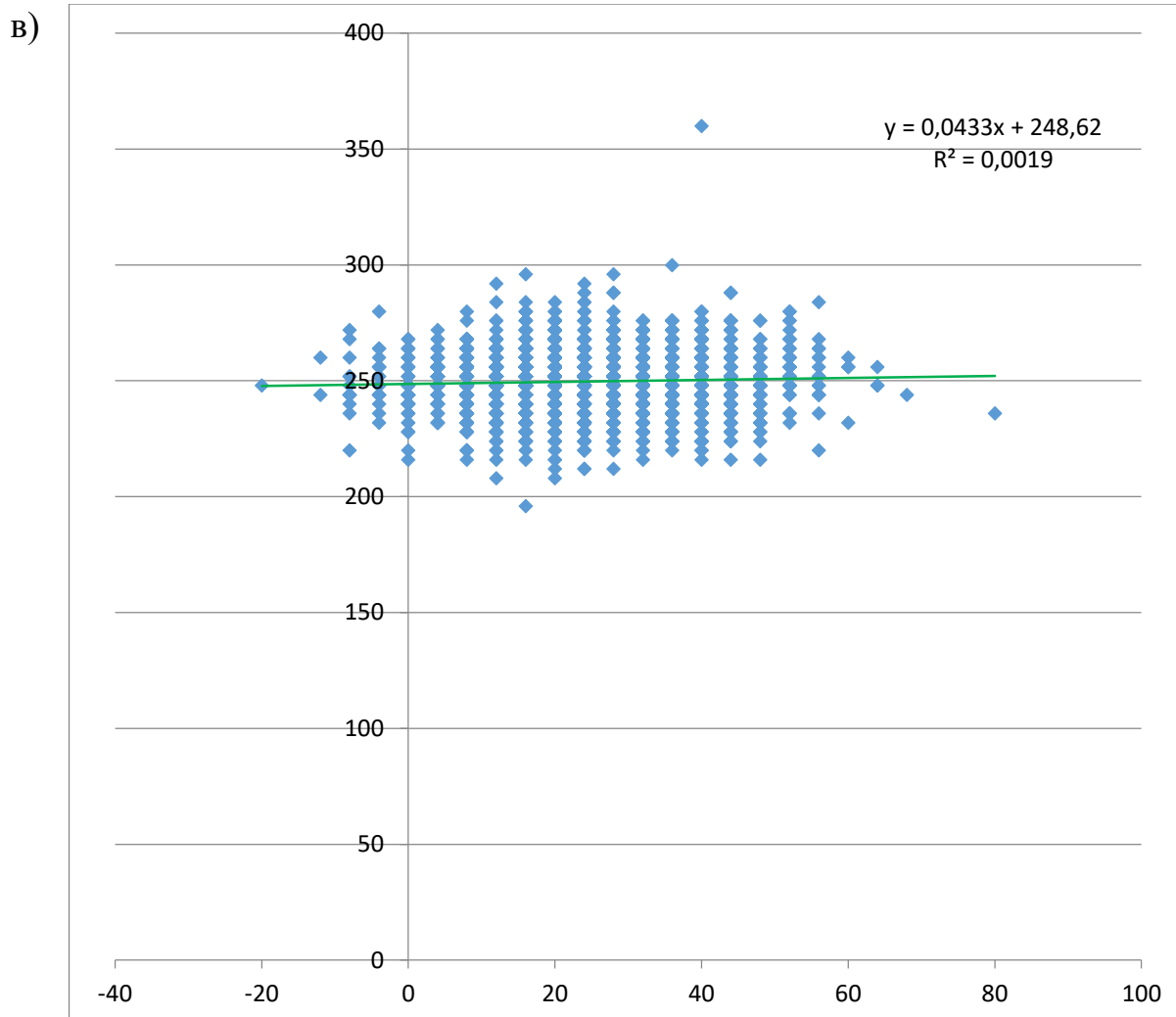


Рисунок 4.5 – Результаты измерений: а – ХУ, б – ХZ, в – YZ

Кроме того, следует обратить внимание на следующее:

- Колебания в паре ХZ по оси Х в основном сконцентрировано в интервале от -30 до 20 при Z от 220 до 300. Увеличение количества колебаний по ходу движения (Х) практически не влияет на колебания по вертикали (Z), т.е. изменения колебаний по ходу движения незначительны, так как коэффициент детерминации практически равен 0.
- В паре ХУ основное облако данных по оси Х лежит в интервале от -30 до 20, по оси Y от -5 до 60. Увеличение количества колебаний по ходу движения (Х) практически не влияет на колебания по оси Y, т.е. изменения колебаний по ходу движения незначительны, так как коэффициент детерминации равен 0.
- В паре YZ Y в основном находится в границах от -5 до 60, а по Z от 220 до 300. Увеличение количества колебаний по оси Y практически не влияет на

колебания по вертикали (Z), т.е. изменения колебаний по ходу движения незначительны, так как коэффициент детерминации практически равен 0.

Таким образом изменения колебаний по осям X и Y практически не влияют на вертикальные колебания хвостового вагона при прохождении мостовой конструкции т.к. коэффициент детерминации практически равен 0, угловые коэффициенты линейных моделей регрессии практически равны 0.

Регрессионный анализ:

На основании обработки данных с помощью метода наименьших квадратов построена двухфакторная регрессионная модель зависимости Z от X и Y:
 $z = -0,01844x + 0,043212y + 248,6115$.

Регрессионная статистика представлена в таблицах 4.8-4.12.

Таблица 4.8 – Регрессионная статистика

Статистический показатель	Значения показателя
Множественный R	0,045247596
R-квадрат	0,002047345
Нормированный R-квадрат	0,001492464
Стандартная ошибка	11,83328422
Количество наблюдений	3600

Коэффициент детерминации R-квадрат равен 0, что говорит об отсутствии линейной зависимости Z от пары XY.

Таблица 4.9 – Дисперсионный анализ

	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	2	1033,31	516,66	3,69	0,03
Остаток	3597	503675,70	140,02		
Итого	3599	504709			

Таблица 4.10 – Статистические показатели регрессионной модели

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95 %	Верхние 95 %
Y-пересечение	248,61	0,45	548,50	0	247,72	249,50
x	-0,02	0,02	-0,84	0,40	-0,06	0,02
y	0,04	0,02	2,58	0,01	0,01	0,07

Таблица 4.11 – Двухфакторный дисперсионный анализ без повторений

Итоги	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия
Z	3600	898832	249,68	140,24
X	3600	-2452	-0,68	79,88
Y	3600	87600	24,33	138,43

Таблица 4.12 – Дисперсионный анализ

Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Строки	13002,52	1	13002,52	32,81	1,08	3,84
Столбцы	5752017	5000	1150,40	2,90	2,65	1,05
Погрешность	1981725	5000	396,35			
Итого	7746745	10001				

Таблица 4.13 – Дисперсионный анализ

Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Строки	1,37E+08	2	68449980	578494,50	0	3,00
Столбцы	438732,4	3599	121,904	1,03	0,15	1,05
Погрешность	851698,6	7198	118,3243			
Итого	1,38E+08	10799				

Исходя из комплексного анализа рис. 4.4 и рис. 4.5 можно сделать следующие выводы:

1. При заходе головного вагона на мост происходит резкий скачок по ХУ (вперед – бок). При движении по мосту изменений не наблюдается, а при выходе резко снижается.

2. При входе и выходе с моста поезд имеет меньшую амплитуду колебаний данных. При колебаниях по оси Х близких к 0 наблюдается наибольший разброс колебаний по вертикали (Z). При увеличении колебаний по модулю по оси Х наблюдается значительное снижение разброса колебаний по оси Z.

3. При входе на мост головного вагона колебания находятся в интервале от 100 до 300, на выходе от 250 до 400. При увеличении по Y идёт снижение по Z. При этом колебания сохраняются в интервалах от 100 до 300 на входе и от 250 до 400 на выходе.

4. Хвостовой вагон при прохождении мостовой конструкции ведет себя более стабильно, чем головной вагон.

5. При сходе поезда с податливого строения пути, а также при въезде на жесткую конструкцию пути мостового сооружения происходит скачкообразные изменения виброускорения кузова вагона.

6. Результаты натурного эксперимента позволяют точно провести валидацию построенной модели.

4.2. Моделирование динамики взаимодействия подвижной многокомпонентной нагрузки по пролетному строению, представленного шарнирно – сочлененным стержнем переменной жесткости

Высокоскоростное железнодорожное движение предполагает повышенные требования не только к подвижному составу, но и к пути, а также прочим железнодорожным сооружениям, и в первую очередь – мостам и эстакадам. При движении высокоскоростного подвижного состава по указанным сооружениям возникают значительные динамические нагрузки, способные вызывать резонансные колебания пролётных строений.

Для оценки влияния параметров подвижного состава и его движения на данные конструкции требуется разработка адекватных расчётных моделей, сочетающих точность и вычислительную эффективность. Для исследования отклика конструкции при прохождении высокоскоростного состава воспользуемся упрощённой моделью моста. В качестве модели поезда используем описанную выше модель, включающую 5 вагонов с двухуровневой подвеской, учитывающей как подрессоренную массу кузовов, так и динамику тележек и колёсных пар. Кинематическая схема модели представлена на рисунке 4.6.

Целью исследования является анализ влияния длины пролёта моста на динамическое поведение системы, включающей путь и подвижной состав, при высокоскоростном движении. Рассматриваемые пролёты различной длины, позволят выявить критические сочетания параметров, приводящие к резонансным явлениям.

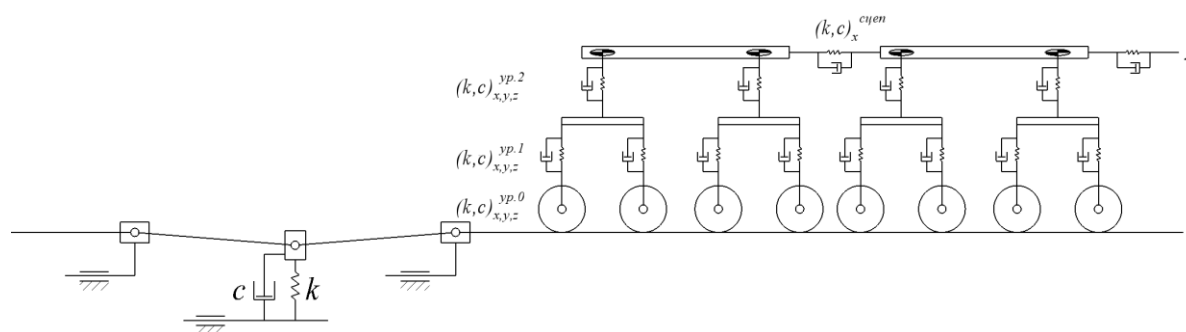


Рисунок 4.6 - Кинематическая схема модели

Рассмотрим задачу в плоской постановке, исключив возможность движения элементов подвески состава вдоль оси Z. Представим пролёт моста в виде

двухопорной балки на шарнирных опорах, работающей на изгиб. Сопротивление изгибу определяется модулем упругости и моментом инерции сечения. Ввиду заведомо малого прогиба балки по отношению к длине (рассматриваемые конструкции допускают прогиб порядка 1/600), вместо классического уравнения Эйлера-Бернулли для первой моды колебаний воспользуемся линейной аппроксимацией по 3 точкам, реализованной в виде эквивалентного рычажного механизма с единственной степенью свободы. Это позволит использовать для моделирования системы метод MBS. Жёсткость балки на изгиб может быть вычислена как

$$k = \frac{48EI}{l^3} \quad (\text{Н/м}),$$

где E , Па – модуль упругости, I , м⁴ – момент инерции сечения, l , м – длина пролёта. В рассматриваемой модели примем значения параметров $E = 200$ ГПа, $I = 0,8$ м⁴ одинаковыми для четырёх моделируемых вариантов длины пролёта $l = 50, 100, 150, 200$ м.

Диссипация энергии в рассматриваемой системе происходит главным образом за счёт внутреннего демпфирования – способности конструкции рассеивать энергию колебаний за счёт необратимых процессов внутри материала (например, вязкого трения между молекулами, дислокациями в кристаллической решётке, и т.п.). Оно не зависит от внешних факторов, таких как воздушное сопротивление и трение в опорах, и является внутренним свойством материала.

Данное явление характеризуется таким параметром, как коэффициент демпфирования. С учётом принятых упрощений, его критическое значение, при котором движение системы теряет колебательный характер (колебания становятся апериодическими), определяется как:

$$c_{\text{крит}} = 2\sqrt{km} \quad (\text{Нс/м}),$$

где m – масса пролёта.

Массу пролёта вычислим для каждого рассматриваемого случая, умножив массу погонного метра – μ , (кг/м) на длину пролёта. Масса погонного метра железнодорожного моста зависит от множества факторов, включая конструкцию моста, материал изготовления, нагрузку, которую мост способен выдерживать, и другие характеристики. Однако существуют ориентировочные значения, используемые в инженерных расчетах: для железнодорожных мостов средней нагрузки масса одного погонного метра, составляет примерно 3...8 тонн. Если речь идет о крупных конструкциях с высокими требованиями к нагрузке и устойчивости, масса может достигать 10...15 тонн на метр длины. Примем $\mu = 3857$ кг/м.

Введём безразмерный параметр ζ – коэффициент затухания, определяющий, насколько демпфирование системы близко к критическому. Рекомендуемые значения данного коэффициента для моделирования различных материалов приведены в технической литературе [78].

Сталь, являясь основным конструкционным материалом, обладает низким демпфированием. В свою очередь, железобетон обеспечивает сравнительно более высокое демпфирование из-за микротрещин и вязкости бетона. Если система состоит из стальных (в большей степени, $\zeta_{\text{сталь}} = 0,1 \dots 2 \%$), и железобетонных элементов (в меньшей, $\zeta_{\text{ж/б}} = 2 \dots 5 \%$), то эквивалентный коэффициент затухания можно оценить как средневзвешенное:

$$\zeta = \alpha \cdot \zeta_{\text{сталь}} + (1 - \alpha) \cdot \zeta_{\text{ж/б}},$$

что при отношении конструкционных материалов $\alpha = 0,8$ даст $\zeta = 0,014$.

Таким образом, коэффициент демпфирования вычислим в зависимости от массы пролёта:

$$c = 2\zeta \cdot \sqrt{km} \text{ (Нс/м)},$$

Частоту собственных колебаний можно вычислить как:

$$f_{natj} = \frac{j^2 \pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu}} \text{ (Гц)},$$

где j – номер моды колебаний балки.

Различные методы колебаний балки представлены на рисунке. 4.7.

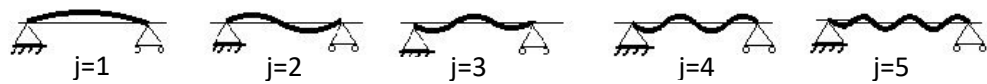
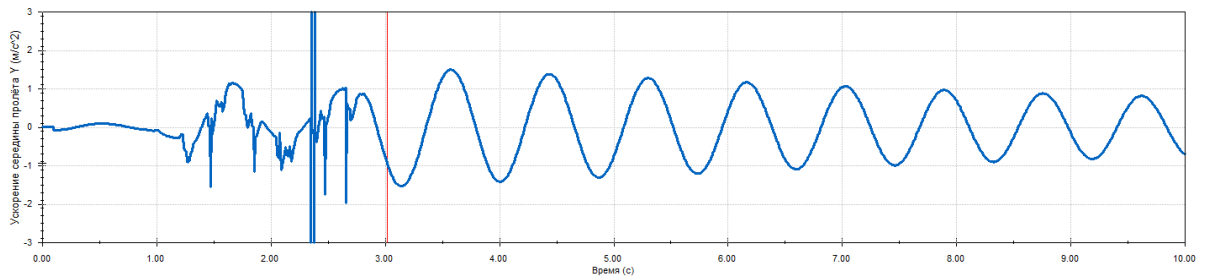


Рисунок 4.7 – Моды колебаний балки

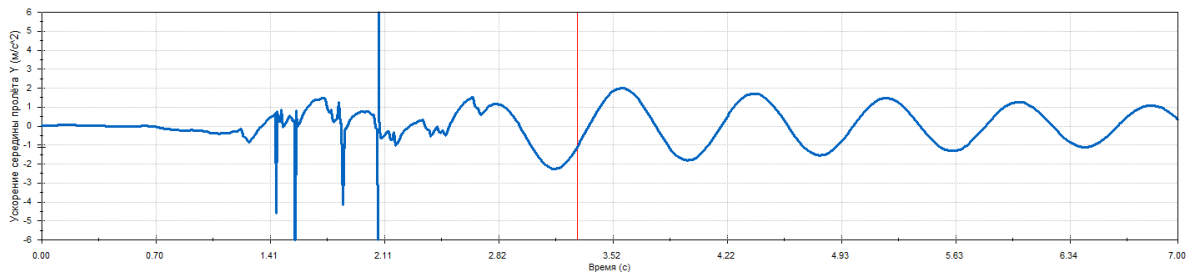
С учётом изложенного выполним моделирование движения экипажа из 5 вагонов по тестовым мостовым пролётам со скоростью 300 км/ч с помощью Solidworks Motion. Методика и алгоритм решения задачи численного моделирования здесь полностью аналогична описанной в разделе 3.4; также используются аналогичные настройки дискретности, точности вычислений и разрешения 3D-контакта.

На рис. 4.8 показаны графические зависимости поступательного ускорения середины пролёта по оси Y при прохождении состава при $E = 200$ ГПа – модуль упругости материала, $I = 0,8$ м⁴ – момент инерции сечения пролетного строения, $\mu = 3857$ кг/м – масса пролёта. Маркером отмечено время выхода последней колёсной пары.

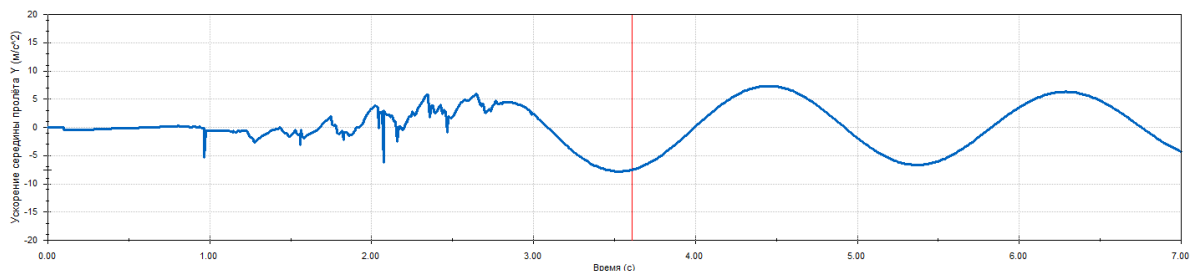
а) $l=50$ м



б) $l=100$ м



в) $l=150$ м



з) $l=200\text{м}$

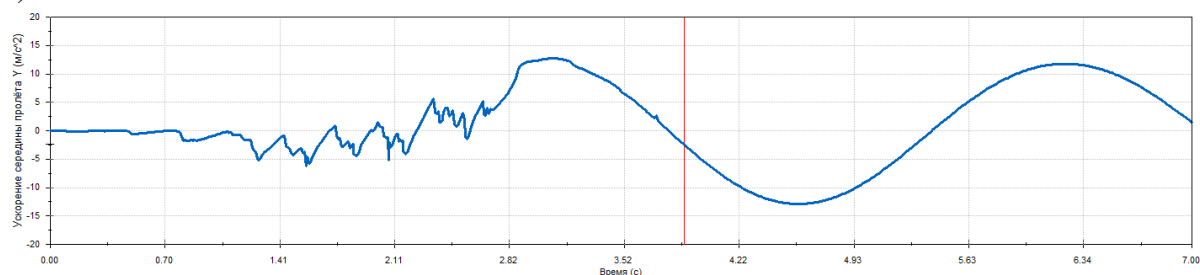


Рисунок 4.8 – Зависимость поступательного ускорения середины пролёта по оси Y при прохождении состава

В таблице 4.14 приведены зависимости жёсткости, коэффициента демпфирования и собственной частоты первой моды колебаний пролёта моста от его длины.

Таблица 4.14 – Расчётные параметры тестовых мостовых пролетов

l , м	k , Н/м	c , Нс/м	f_{nat1} , Гц
50	61440000	96381,45	4,04683
100	7680000	48190,73	1,01165
150	2275556	32127,15	0,44965
200	960000	24095,36	0,25291

Анализ результатов проведенного моделирования динамического взаимодействия высокоскоростного состава с мостовыми пролётами различной длины, позволяет выявить следующие ключевые закономерности:

1. Во всех случаях наблюдается возбуждение колебаний с собственной частотой пролёта при прохождении последней тележки через последнюю четверть длины моста. Максимальные ускорения фиксируются в момент завершения движения состава по пролёту, что свидетельствует о переходном резонансном эффекте. Таким образом, во время прохождения поезда приложение контактной нагрузки находится на резонансных частотах и не представляет угрозы конструкции, однако после прохождения возможно явление механического резонанса; это подтверждается опытом эксплуатации [79, 94 – 101] и, несомненно, заслуживает дальнейшего изучения.

2. Собственные частоты, полученные аналитически (1-я мода), хорошо согласуются с результатами моделирования.

3. Выявленный механизм возбуждения колебаний после прохождения состава объясняет наблюдаемые на практике вибрации мостов. Полученные данные подчёркивают необходимость учёта не только нагруженного, но и разгруженного состояния пролёта при проектировании.

4.3. Валидация модели

Для валидации компьютерной модели произведём сравнение экспериментальных данных, полученных в разделе 4.1 с данными компьютерного моделирования. Для этого повторим симуляцию, описанную в разделах 4.2 при постоянной скорости 190 км/ч и длине пролёта моста 88,6 м. В силу случайной природы многих факторов, непосредственно влияющих на измеряемые параметры, для сравнительной оценки целесообразно воспользоваться спектральной плотностью мощности (СПМ, англ. Power Spectral Density, PSD) ускорений кузова. Спектральная плотность мощности – это метод анализа сигналов, который показывает, как мощность сигнала распределена по разным частотам. В контексте измерений ускорения СПМ позволяет:

1. Выявить скрытые периодические составляющие в шумных данных.
2. Определить доминирующие частоты вибрации, на которых сосредоточена основная энергия колебаний системы поезд – путь – мост, а также как гармонические составляющие влияют на общую динамику.
3. Качественно сравнить реальные измерения с результатами компьютерного моделирования, чтобы проверить адекватность модели.

Для дискретных измерений определение СПМ включает следующие основные этапы:

1. Преобразование Фурье:

Исходный трёхкомпонентный вектор ускорения $a(t)$ преобразуется в частотную область с помощью преобразования Фурье:

$$A(f) = \mathcal{F}\{a(t)\},$$

где $A(f)$ – комплексный спектр амплитуд.

2. Расчет СПМ

СПМ вычисляется путем возведения амплитуд спектра в квадрат и нормировки на частотное разрешение:

$$PSD(f) = \frac{|A(f)|^2}{N \cdot F_s},$$

где N – количество точек в сигнале, F_s – частота дискретизации.

Для оценки сигналов с существенной шумовой составляющей целесообразно использовать усреднение (например, методом Уэлча): при этом сигнал разбивается на перекрывающиеся сегменты, для каждого вычисляется СПМ, затем результаты усредняются.

Для корректного сравнения спектральных характеристик экспериментально измеренных ускорений и результатов MBS-моделирования необходимо выполнить последовательную обработку данных.

На первом этапе экспериментальные данные подвергаются фильтрации с использованием фильтра Калмана, который эффективно подавляет случайные шумы измерений, сохраняя при этом полезный сигнал. Фильтр Калмана настраивается на основе модели постоянной скорости, где матрица перехода учитывает временной шаг дискретизации данных, а ковариационные матрицы шумов процесса и измерений подбираются эмпирически для оптимального соотношения между сглаживанием и сохранением динамических характеристик сигнала.

В настоящей работе были эмпирически подобраны следующие настройки фильтра: коэффициент диагональной единичной матрицы ковариации шума процесса Q принят 0,01 при ковариации шума измерений $R = 0,99$, что соответствует умеренному сглаживанию при сохранении динамики. Приведённые настройки подходят для анализа низкочастотных колебаний (0-10 Гц) в подвесках транспортных средств, где важно сохранить основные динамические характеристики, отфильтровав высокочастотные помехи измерений.

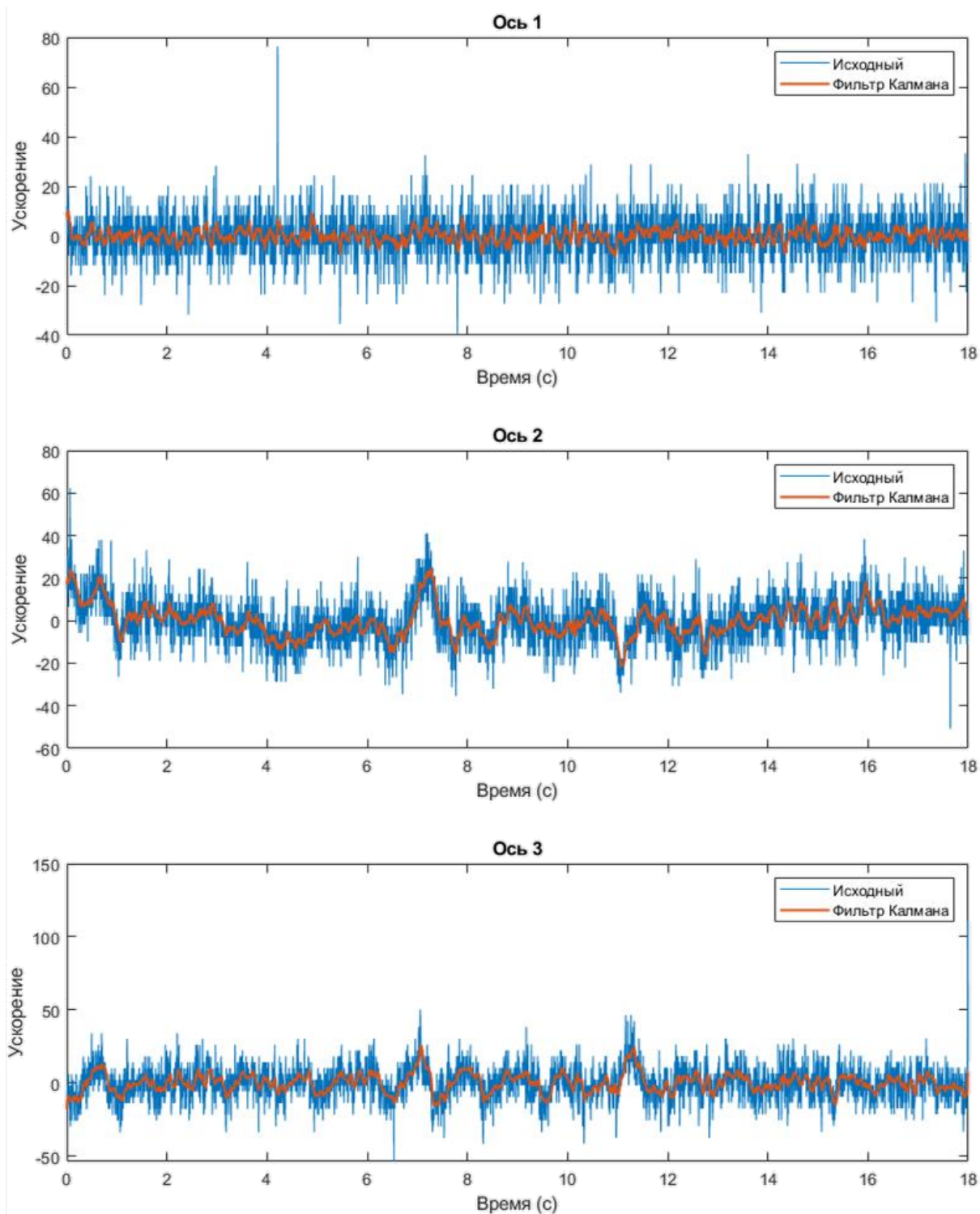


Рисунок 4.9 – Сравнение исходного и отфильтрованного измеренного сигнала

После фильтрации для обоих наборов данных – экспериментального и модельного (рис. 4.9) – выполняется расчет спектральной плотности мощности с использованием метода Уэлча. Важным аспектом является использование одинаковых параметров анализа: размера окна, степени перекрытия сегментов и количества точек БПФ, что обеспечивает сопоставимость результатов. Частота дискретизации в обоих случаях должна быть идентичной.

На этапе визуализации строятся графики спектральной плотности мощности, позволяющие наглядно сравнить распределение энергии по частотам для эксперимента и модели (рис. 4.10).

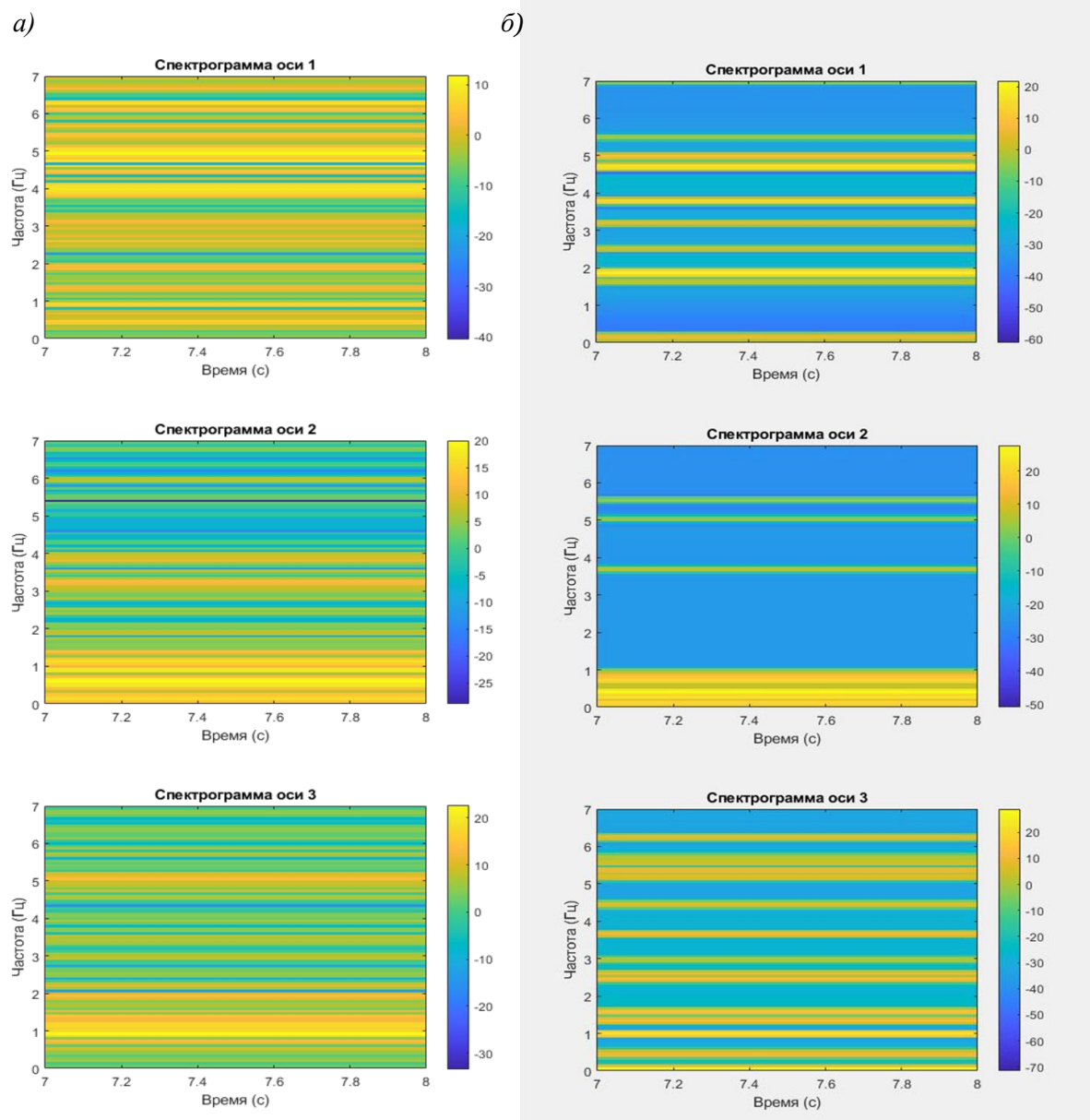


Рисунок 4.10 – Сравнение спектрограмм а) измеренного и б) смоделированного ускорения

Заключительным этапом является интерпретация выявленных расхождений, которая может потребовать уточнения параметров MBS-модели, в частности характеристик демпфирующих элементов и параметров жесткости подвески. Полученные результаты позволяют сделать выводы об адекватности модели и при необходимости скорректировать ее параметры для более точного

соответствия реальной динамике системы. Использование фильтра Калмана на этапе предварительной обработки экспериментальных данных существенно повышает достоверность такого сравнения, минимизируя влияние помех.

Анализ спектрограмм измеренного и смоделированного ускорения кузова вагона позволяет выявить следующие закономерности:

1. Значительное снижение количества побочных линий спектра колебаний на спектрограммах смоделированных ускорений по сравнению с измеренными объясняется с одной стороны дискретностью модели и принятыми упрощениями, с другой – многофакторной природой внешнего воздействия на кузов, затрудняющей фильтрацию побочных колебаний. Тем не менее, если допустить, что основная энергия колебаний обусловлена механическими характеристиками системы, сравнение расположения основных линий спектра, соответствующих наиболее высокоэнергетическим колебаниям, позволит сделать вывод о соответствии механических характеристик модели объекту моделирования.

2. По оси 1 (соответствует оси X модели и движению вдоль пути) спектрограмма измеренного ускорения показывает колебания в широком спектре частот, при этом наиболее яркие линии соответствуют окрестностям 5, 4 и 2 Гц. Спектрограмма смоделированного ускорения также содержит данные линии, однако наблюдается смещение в сторону низких частот. Данный факт может говорить о необходимости уточнить значения коэффициентов демпфирования подвески и сцепного устройства по оси X и заслуживает отдельного исследования.

3. По оси 2 (соответствует оси Z модели и поперечному перемещению) обе спектрограммы указывают на то, что энергия колебательных процессов сосредоточена в окрестностях 0,5 Гц, при этом для смоделированных ускорений также присутствует смещение в низкочастотную область.

4. По оси 3 (соответствует оси Y модели и вертикальному перемещению) обе спектрограммы показывают, что наибольшая доля энергии низкочастотных колебаний (порядка 20 %) сосредоточена в окрестностях 1 Гц.

Таким образом, механические характеристики системы смоделированы корректно при некоторых допущениях, однако большое количество линий при относительной однородности спектра измеренных ускорений говорит о достаточно высоком уровне широкополосного шума, в том числе в низкочастотном диапазоне, что свидетельствует о необходимости доработки методики и средств проведения измерений, которая в ходе дальнейших исследований позволила бы более точно подобрать коэффициенты демпфирования для численной модели.

4.4. Численное моделирование аэродинамического взаимодействия сочлененного многофюзеляжного состава с приближенной инфраструктурой

Рациональным способом проведения исследований является численное моделирование в программных комплексах, таких, как FlowSimulation SolidWorks.

Алгоритмические решения численного моделирования аэродинамического взаимодействия, сочлененного многофюзеляжного состава с приближенной инфраструктурой в графическом виде представлены на рисунке 4.11.

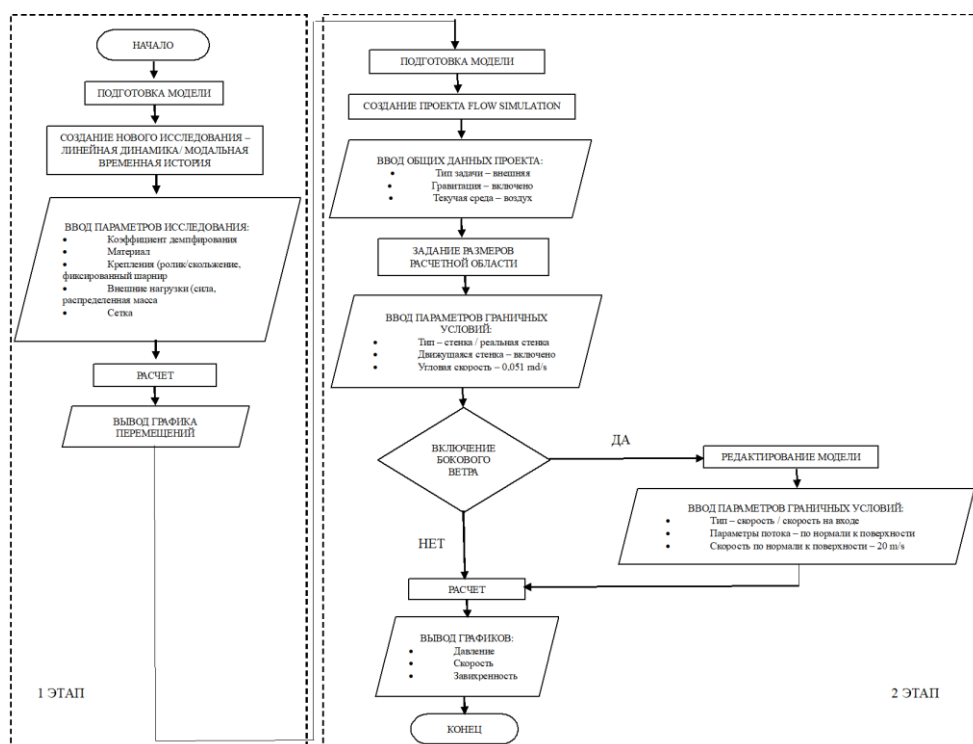


Рисунок 4.11 – Алгоритм решения численного моделирования аэродинамического взаимодействия сочлененного многофюзеляжного состава с приближенной инфраструктурой

Численное моделирование проводилось в трехмерной постановке в два этапа:

На первом этапе применялся модуль Simulation программного пакета SolidWorks. Модуль Simulation – инструмент для структурного анализа, в котором используется метод конечных элементов. Такой анализ позволяет прогнозировать поведение изделия в реальной среде путем виртуального тестирования подготовленной модели. При использовании модуля Simulation применялся инструмент с функцией линейного динамического анализа.

На втором этапе выполнялся расчет по методике «Frozen Rotor», описанной в главе 2 в модуле FlowSimulation.

Подготовка модели для расчета в модуле Simulation заключалась в следующем:

1. Создание модели шарнирно – сочлененного состава, состоящего из трех вагонов высокоскоростного пассажирского поезда «Сапсан» (Velaro Rus), соединенных упругой связью, обеспечивающей возможность взаимного перемещения вагонов.
2. Создание модели опоры, моделирующей рессорное подвешивание и обеспечивающей адекватные значения колебательного процесса состава на мостовой ферме.
3. Формирование модели нахождения состава в объеме ферменного сооружения пролетного строения моста.

При моделировании использована созданная трехмерная модель высокоскоростного пассажирского поезда «Сапсан» (Velaro Rus), в которой учитывались упругие связи, обеспечивающие корректное взаимное перемещение вагонов в пространстве (рис. 4.12).

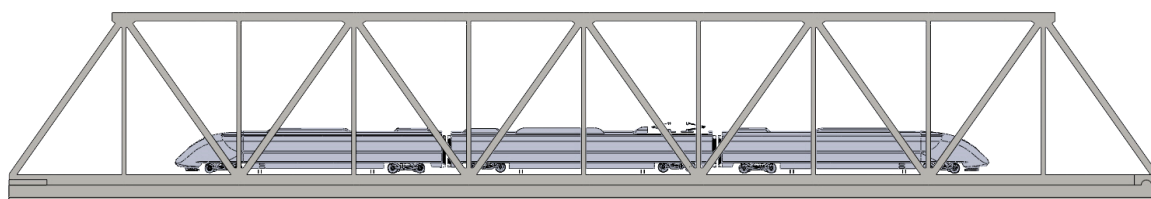


Рисунок 4.12 – Модель системы «поезд – ферменный мост»

С целью снижения размерности задачи система подвески экипажной части заменена структурой, обладающей динамическими свойствами аналогичными реальным (рис. 4.13).

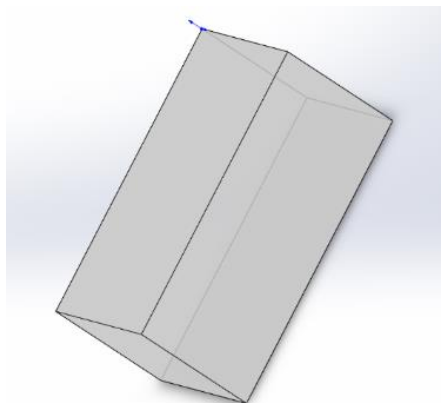


Рисунок 4.13 – Модель опоры рессорного подвешивания

Подбор характеристик материала и геометрии опор при известной жесткости рессорного подвешивания высокоскоростного пассажирского поезда «Сапсан» (Velaro Rus) обеспечил податливость в соответствии с данными колебательного процесса совместной работы элементов системы «мост – поезд».

Серия экспериментов позволила определить податливость модели подвески, соответствующую адекватным значениям колебательного процесса рессорного подвешивания. Суть эксперимента состояла в том, чтобы получить податливость опоры (её вертикальные перемещения), соответствующую данным, указанным в главе 3. С этой целью дискретно менялась геометрия (площадь поперечного сечения параллелепипеда) и варьировался материал опоры.

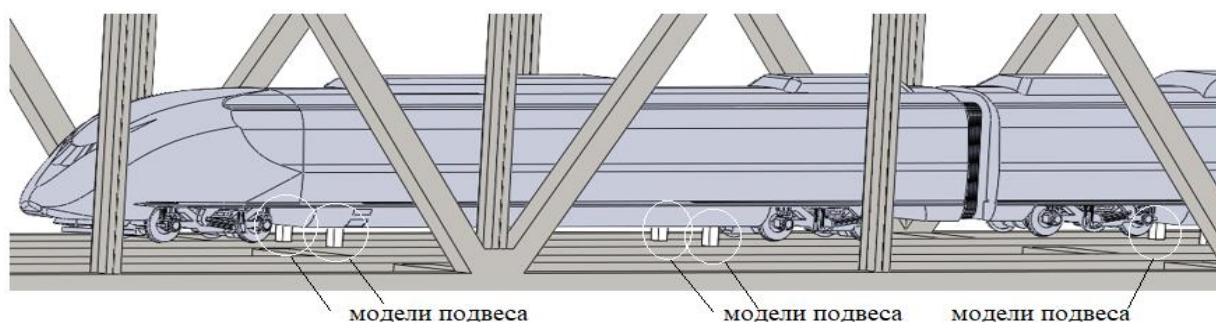


Рисунок 4.14 – Модель рессорного подвешивания высокоскоростного электропоезда «Сапсан» (Velaro Rus)

В качестве одной из применяемых внешних нагрузок использовалась вертикальная составляющая силы контактного взаимодействия колеса и рельса Q_y , (рис. 4.14). Для корректного применения в модуле Simulation исходная

кривая временной характеристики приложенной силы обработана фильтром сглаживания, скользящего среднего в программе MathLab (рис. 4.15).

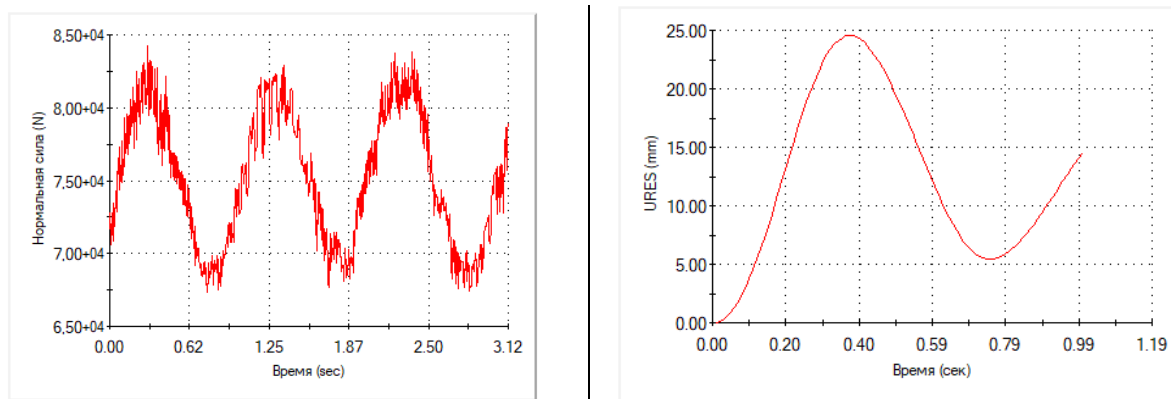


Рисунок 4.15 – Обработанная кривая в программе MathLab, и результирующая кривая перемещений

В результате проведенных исследований была получена эпюра результирующих перемещений системы «поезд – мост», показанная в виде деформированного результата на рисунке 4.16.

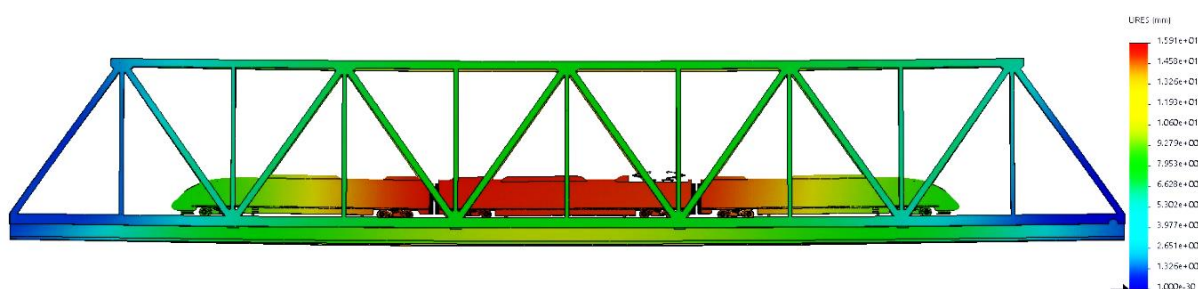


Рисунок 4.16 – Эпюра результирующих перемещений системы «поезд – мост»

При сканировании значений пространственного положения вагонов вдоль состава с помощью инструмента «зондирование» были получены точечные амплитудные значения вертикальных и горизонтальных перемещений корпусов вагонов состава (рисунок 2.20). Данные значения использовались в качестве граничных условий для второго этапа, заключающегося в применении методики «Frozen Rotor», описанной в главе 2.

С этой целью положения вагонов состава при подготовке модели смещалось в вертикальном и горизонтальном направлениях в соответствии со значениями полученных перемещений при динамическом исследовании в модуле

Simulation. На следующем этапе сформированная модель электропоезда используется в численном моделировании аэродинамического взаимодействия сочлененного многофюзеляжного состава с приближенной инфраструктурой.

4.5. Результаты численного моделирования аэродинамического взаимодействия сочлененного многофюзеляжного состава с приближенной инфраструктурой

На рисунке 4.17, а также в таблице 4.15 представлены изображения, поясняющие общую схему компьютерного эксперимента по численному моделированию аэродинамического взаимодействия, сочлененного многофюзеляжного состава с приближенной инфраструктурой.

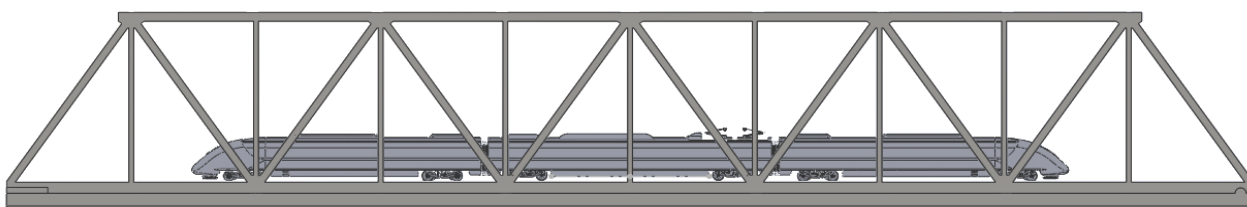
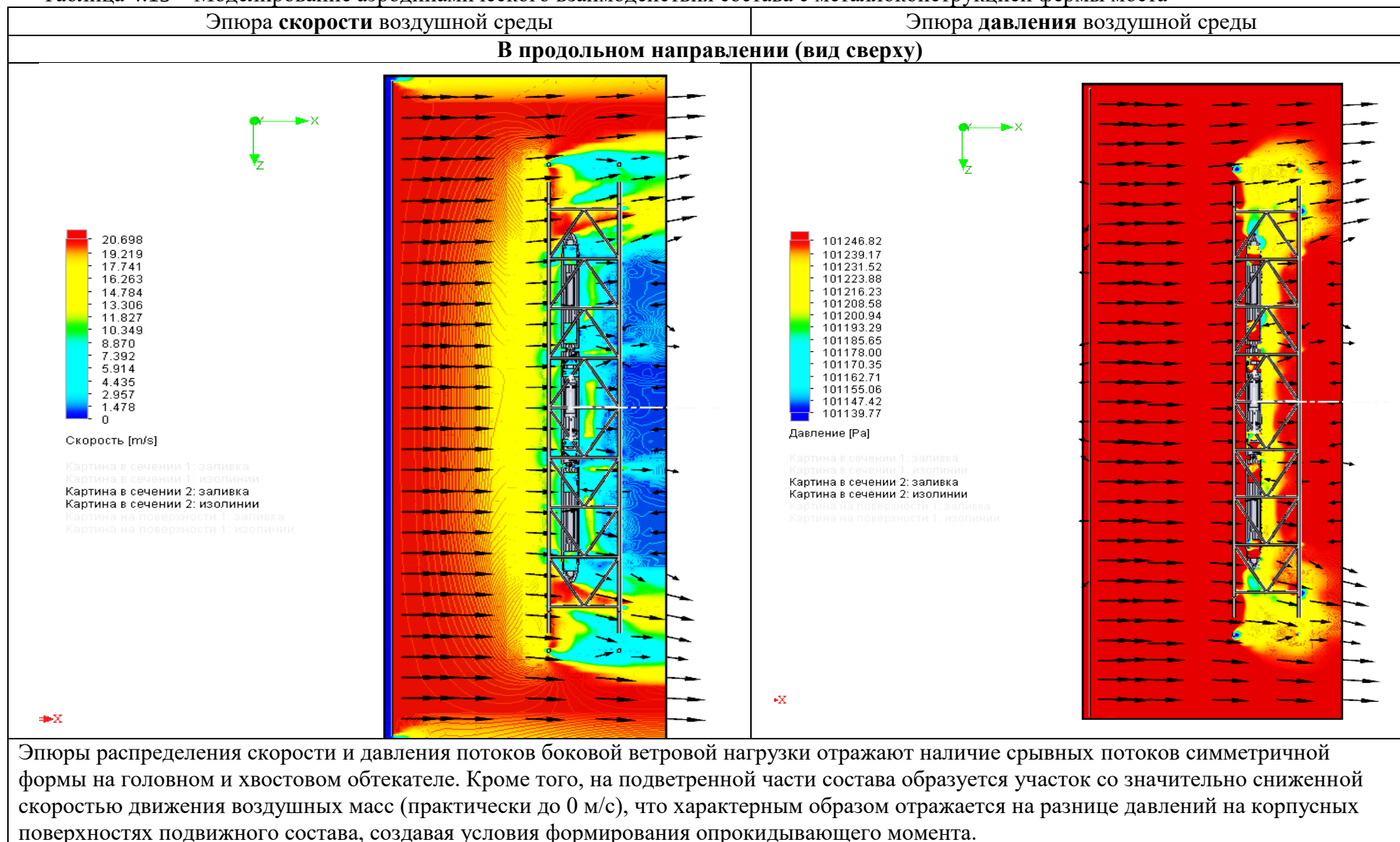


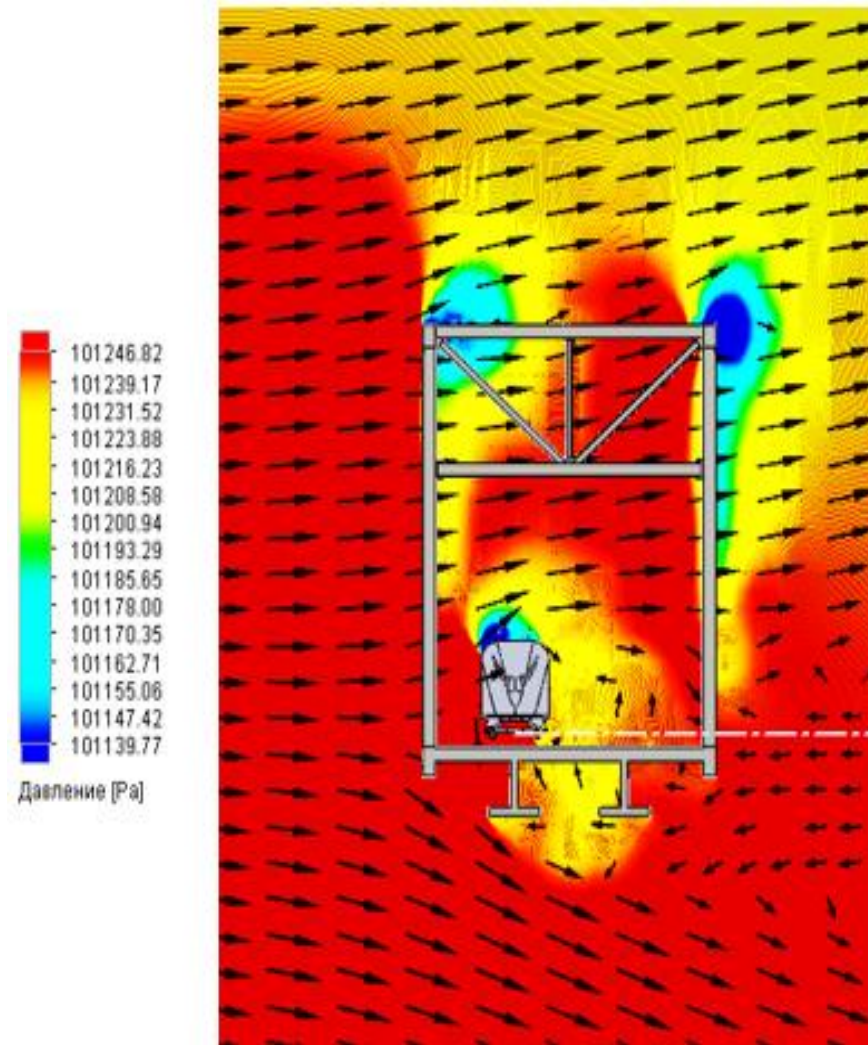
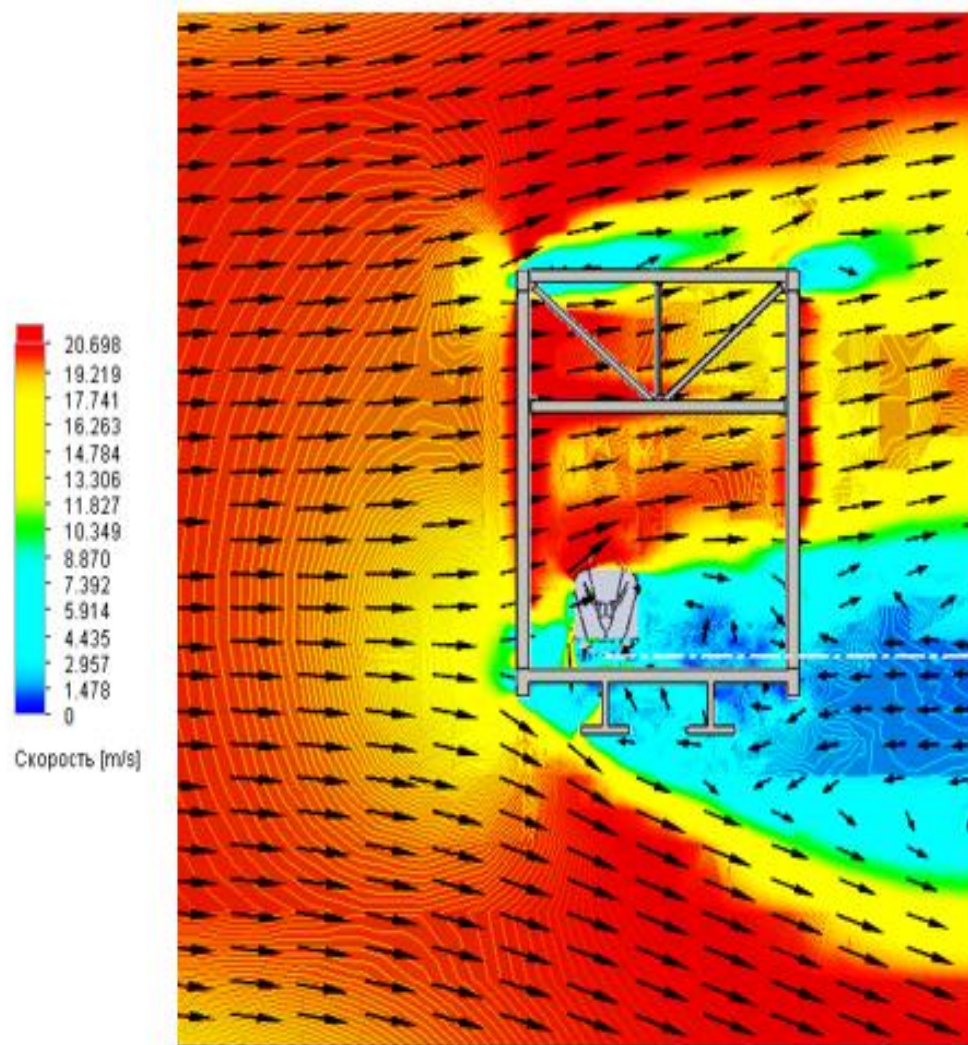
Рисунок 4.17 – Расположение подвижного состава относительно фермы пролетного строения моста в компьютерном эксперименте по определению аэродинамического взаимодействия

Таблица 4.15 – Моделирование аэродинамического взаимодействия состава с металлоконструкцией фермы моста

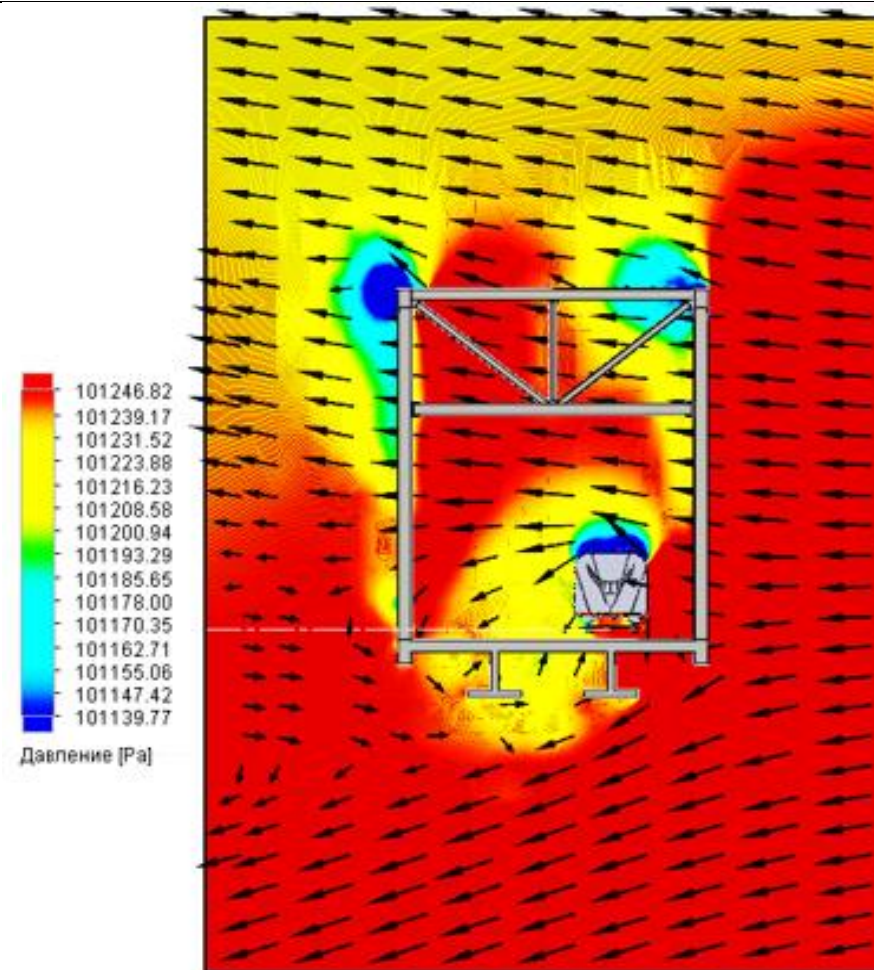
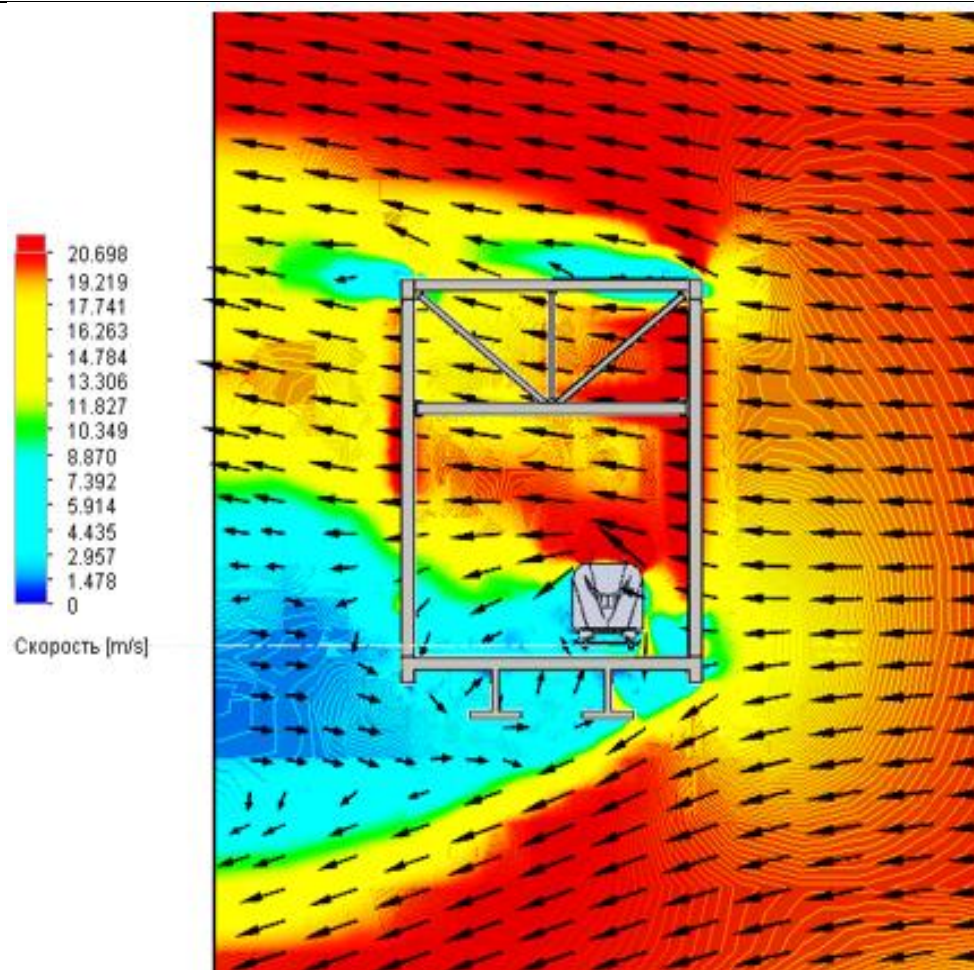


В направлении поперечном оси состава

Головная часть



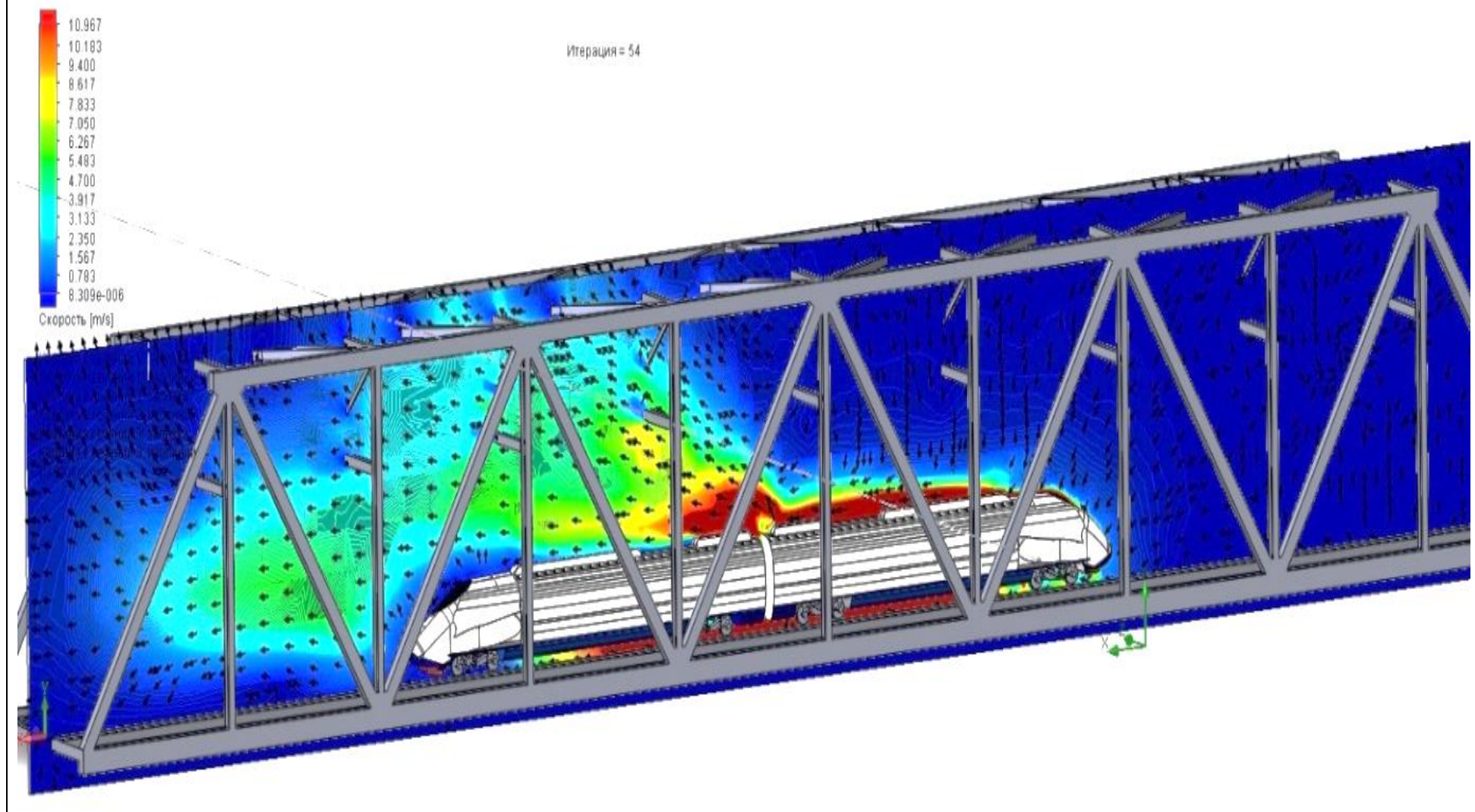
Хвостовая часть



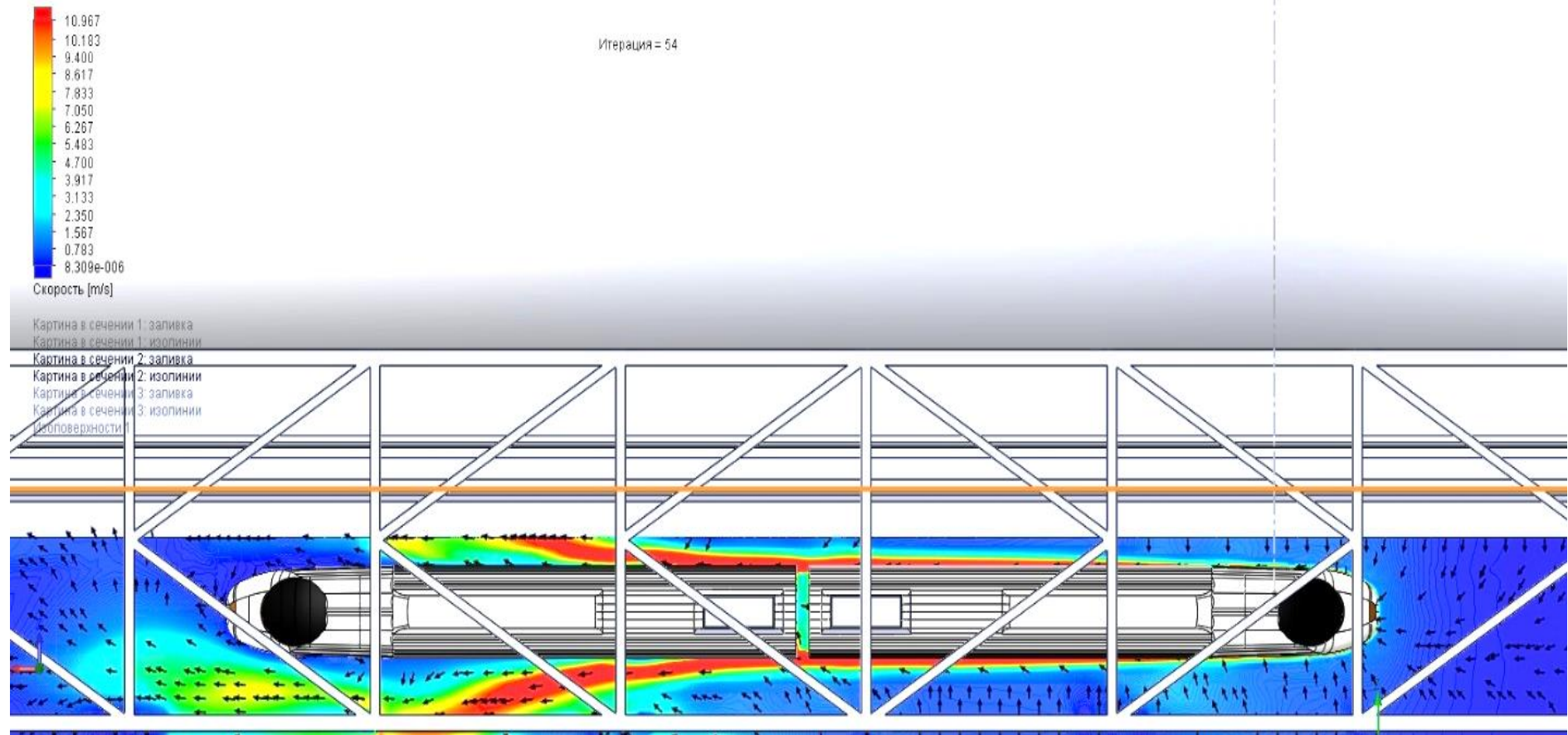
На эпюрах в поперечном направлении представлен процесс формирования опрокидывающего момента за счет разницы давлений воздушной среды на поверхности корпусов подвижного состава в головной и хвостовой части. В обоих случаях картина имеет подобный вид: повышенное давление на подветренной части, и пониженное давление в надкрышевой и боковой поверхностях корпуса состава. На хвостовом обтекателе процесс имеет более выраженную интенсивность.

С учетом движения состава

Эпюра скорости вязкой среды в вертикальной плоскости вдоль оси состава

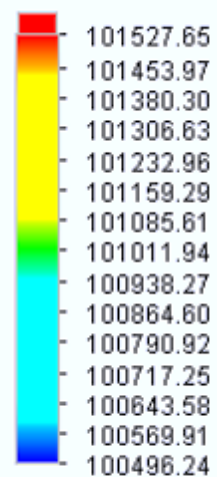


Эпюра скорости вязкой среды в горизонтальной плоскости вдоль оси состава

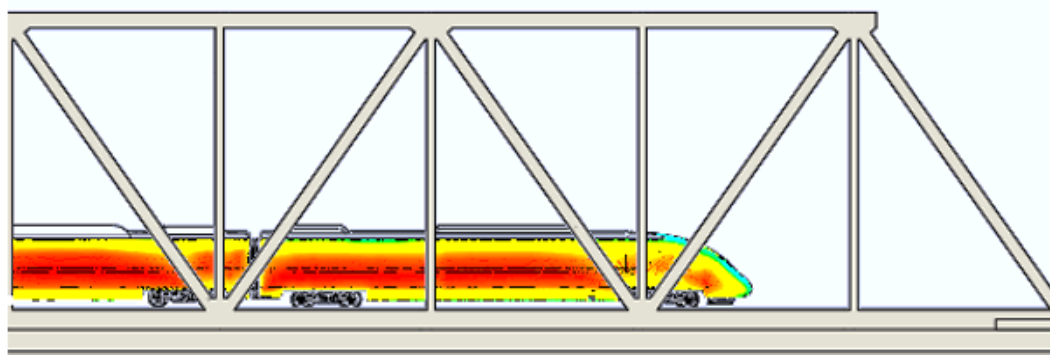
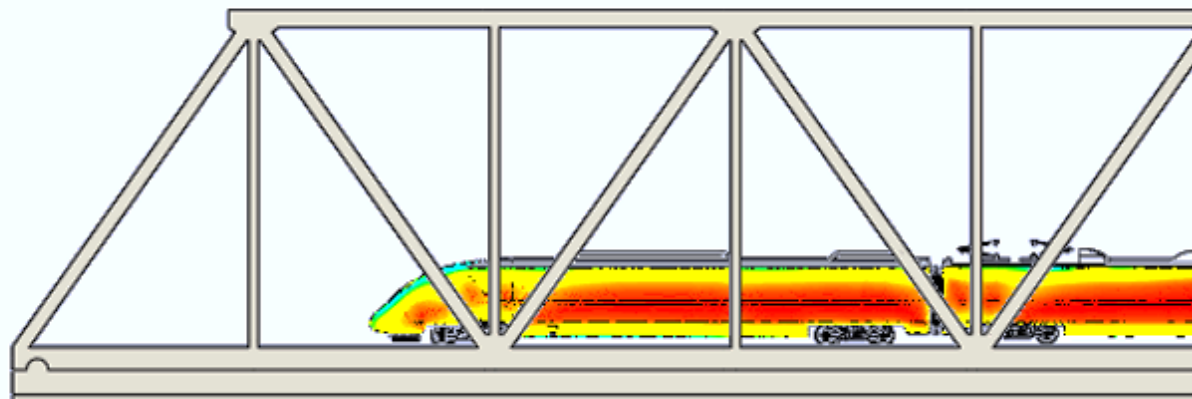


С учетом движения состава отмечаются характерные процессы, похожие для движения поезда на эстакаде (гл. 2): в частности, обнаружена выраженная устойчивая тенденция к смещению участков вихреобразования в направлении хвоста поезда. К особенностям структуры вязкой среды в пределах объема металлоконструкции фермы следует отнести высоко интенсивный процесс торможения ускоренных масс за счет взаимодействия с неподвижными элементами фермы. 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.

Распределение давления воздушной среды на поверхности состава



Давление [Pa]



Таким образом конфигурация наветренных площадей на поверхности состава на головном и хвостовом вагонах подобны, что позволяет применить равномерное распределение давления по эффективной площади на боковой поверхности.

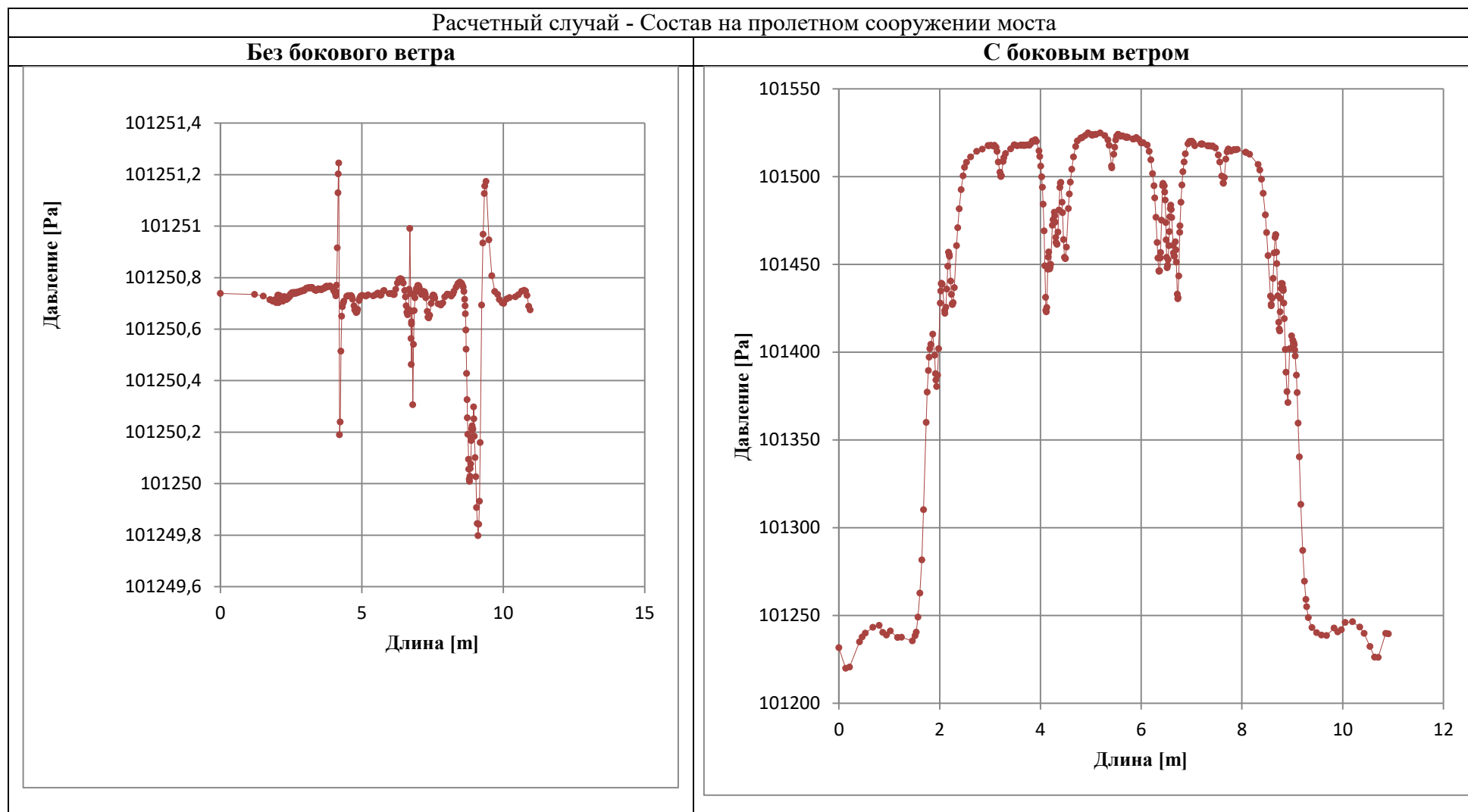
Наблюдаемые параметры процесса омывания текучей средой корпуса состава сканировались по линии, расположенной вдоль боковой поверхности корпуса состава на дистанции 20 мм, на высоте 1 м над УГР по длине состава (табл. 4.17).

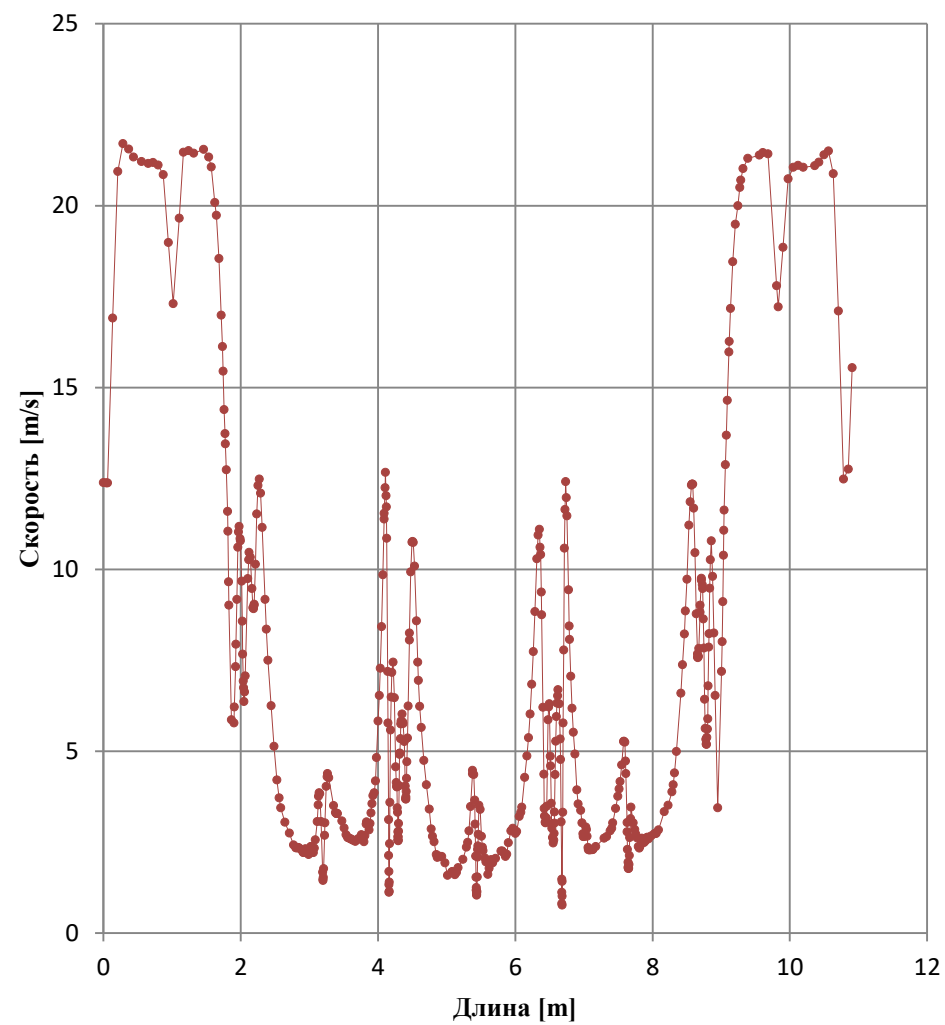
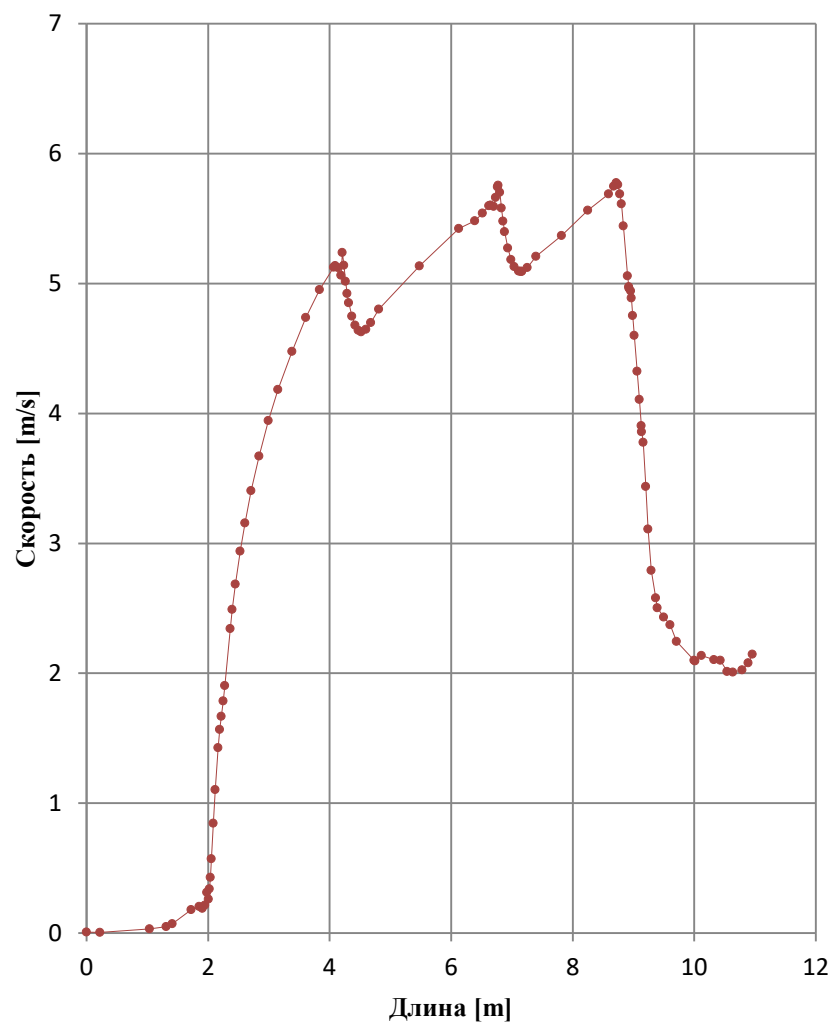
В отсутствие боковой ветровой нагрузки при нахождении состава на ферме максимальные амплитуды колебания давления незначительны (менее 2 Па), характерный скачок импульса давления на головном обтекателе подобен движению на открытой местности, скоростная эпюра отражает незначительные изменения скорости потоков (менее 3 м/с). Для завихренности характерно возмущение в виде постепенного снижения вдоль длины состава.

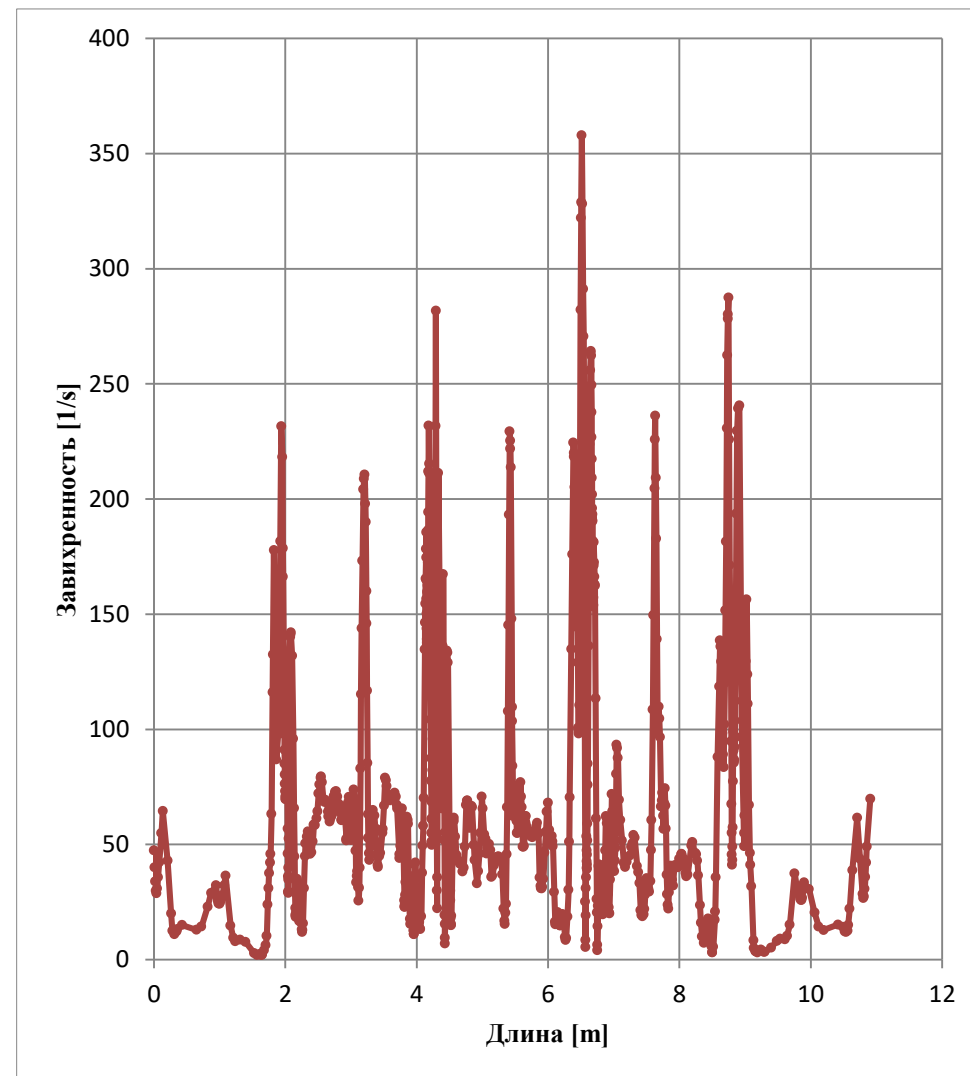
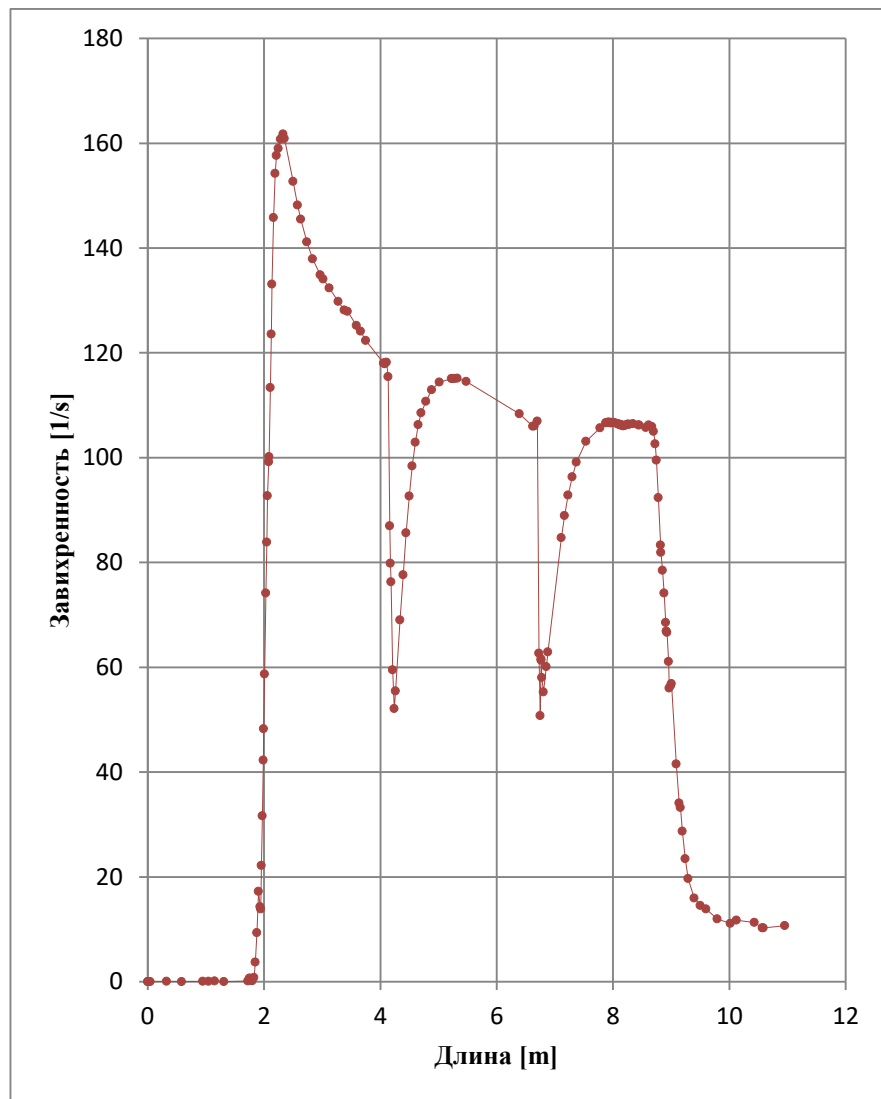
С наличием боковой ветровой нагрузки наблюдается рост динамической составляющей давления на головном обтекателе, а также, на протяжении вдоль всего состава, при этом значение превышает в среднем на 270 Па вариант без боковой ветровой нагрузки; на скоростной эпюре отмечается существенное изменение конфигурации скоростных потоков – значительный рост (в 4 раза) амплитуды колебаний по всей длине состава; завихренность также кратно возрастает (в среднем в 2 раза), и имеет продолжение в виде системы колебательных импульсов возрастающей мощности по всей длине состава.

При движении высокоскоростного поезда возникают локальные возмущения воздушной среды, представляющей собой формирование головной, хвостовой и промежуточной (для сдвоенных высокоскоростных поездов) бегущих знакопеременных воздушных волн с областями повышенного - избыточного и пониженного - разреженного давлений.

Таблица 4.17 – Результаты моделирования параметров вязкой среды при движении состава без бокового, и с боковым ветром







Возмущения в промежутке между волнами связаны в первую очередь с вязкостным трением воздуха о стенки корпуса состава и имеют турбулентный характер со всплесками, аналогичными головной и хвостовой волнам в промежутках между вагонами.

Качественно вид распределения давлений единообразен для всех типов подвижного состава и незначительно зависит от параметров, характеризующий конкретный тип подвижного состава. Количественно же значения давлений значительно зависят от скорости поезда и формы его корпуса.

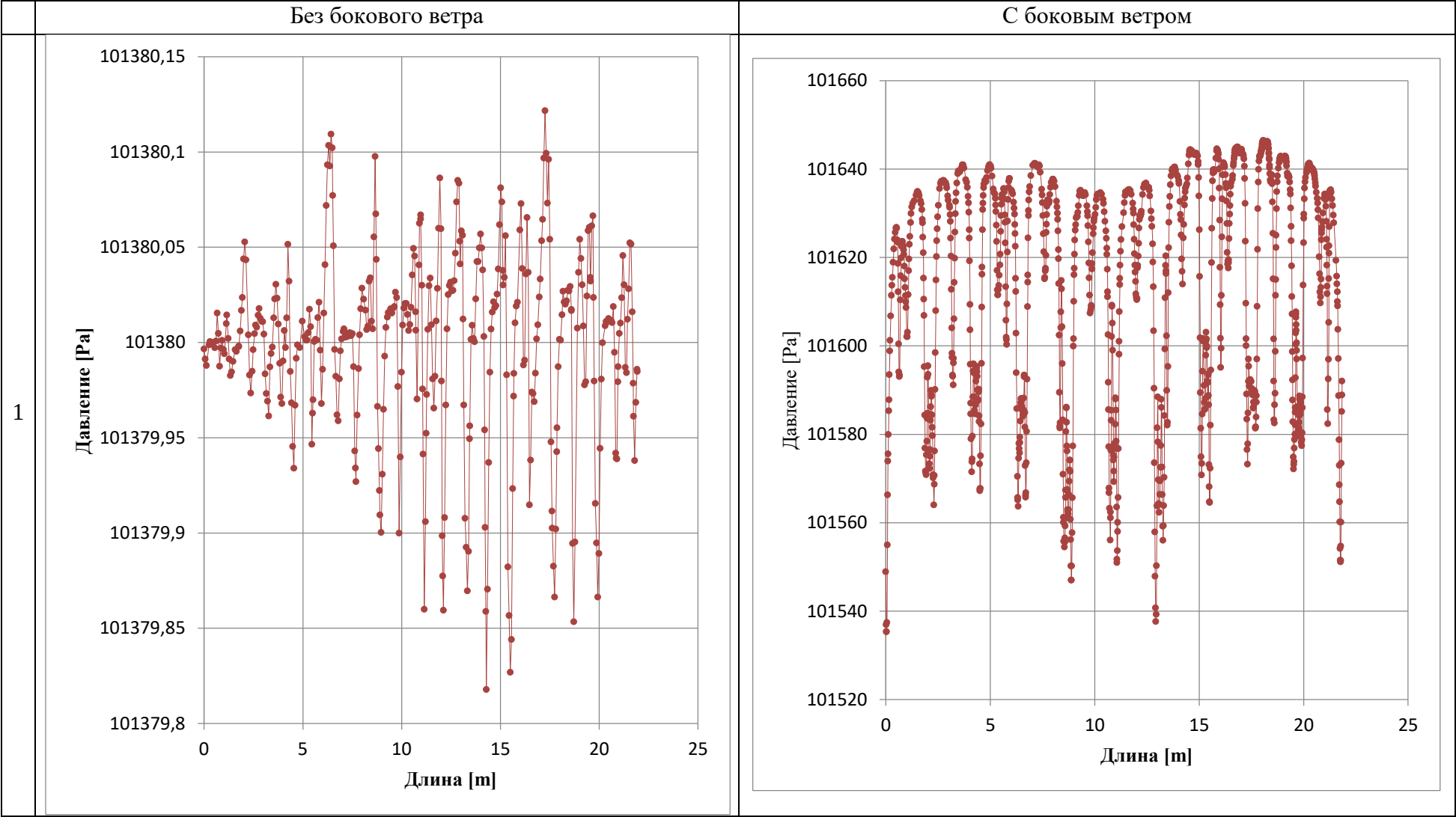
Геометрическая форма корпуса подвижного состава влияет на распределение воздушных потоков вокруг корпуса которое, в свою очередь, оказывает значительное влияние на аэродинамическое сопротивление движению высокоскоростного поезда.

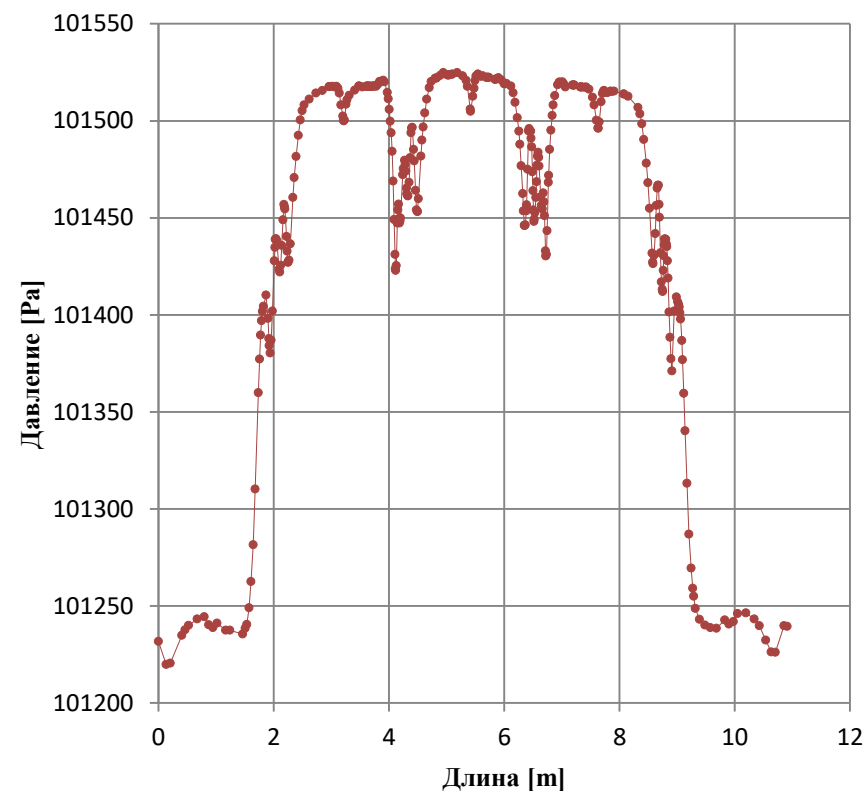
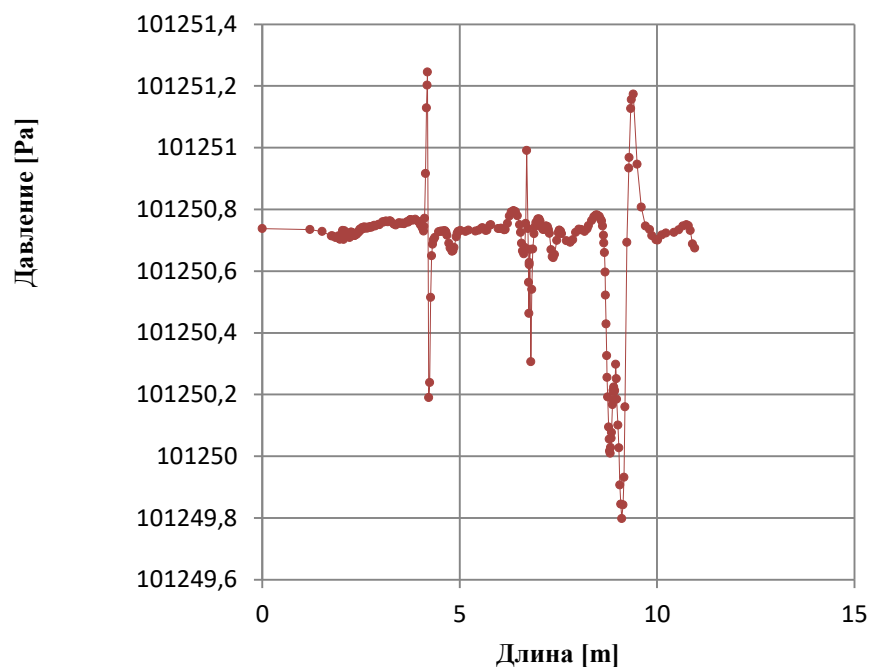
Созданные движущимся поездом волны давлений оказывают влияние и на конструкции и сооружения, находящиеся в непосредственной близости от оси пути. Одними из наиболее подверженных аэродинамическому воздействию сооружений являются ферменные пролётные строения железнодорожных мостов.

4.6 Сравнительный анализ параметров воздушной среды при движении поезда в объеме металлоконструкции пролетного строения ферменного моста с учетом и без учета колебательных процессов многофюзеляжного состава

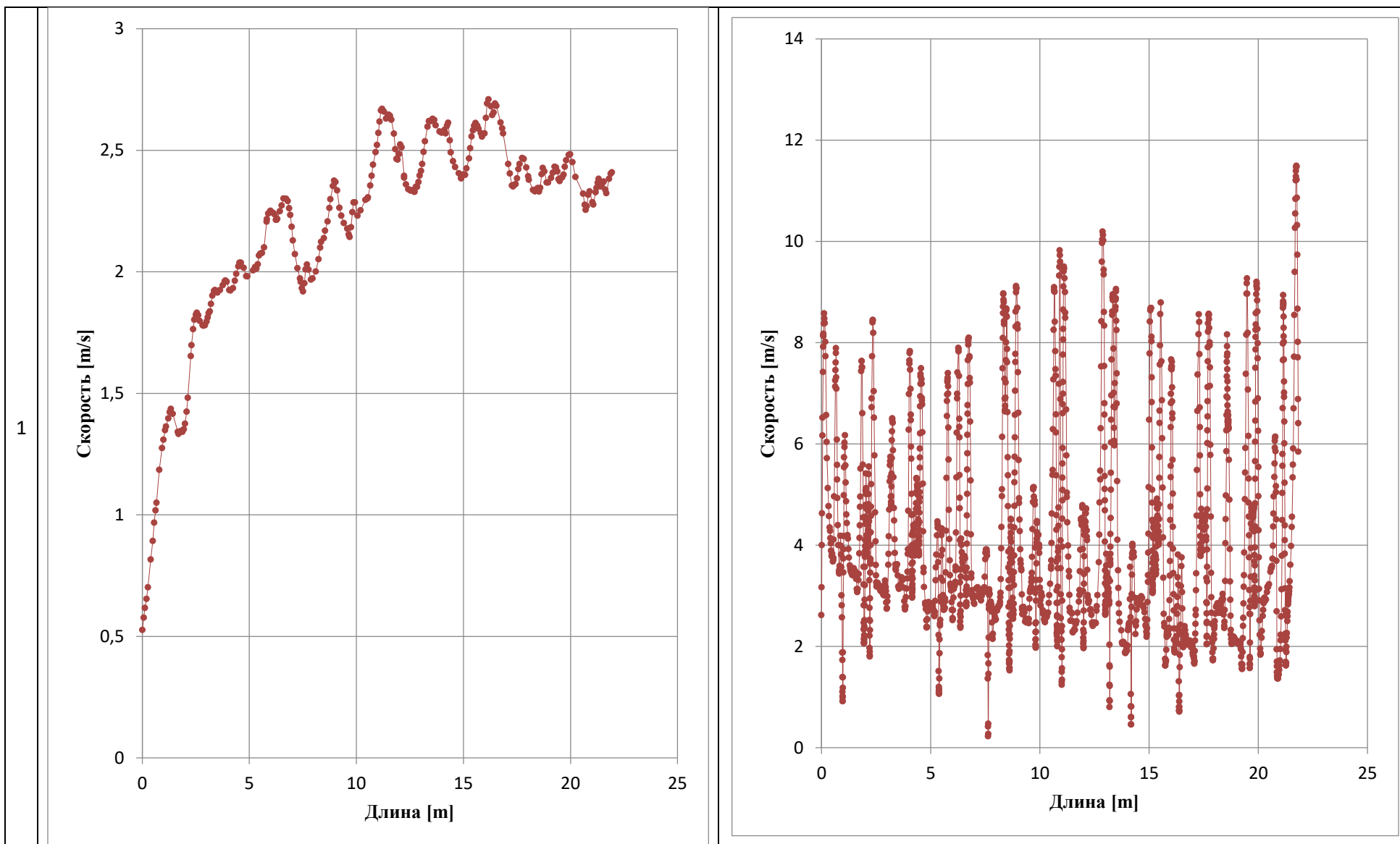
Сравнительный анализ (табл. 4.18) параметров воздушной среды при моделировании движения поезда в объеме металлоконструкции пролетного строения ферменного моста в классической постановке задачи, то есть без учета колебательных процессов многофюзеляжного состава, металлоконструкции моста, и с учетом возмущающих факторов ускоренной воздушной среды.

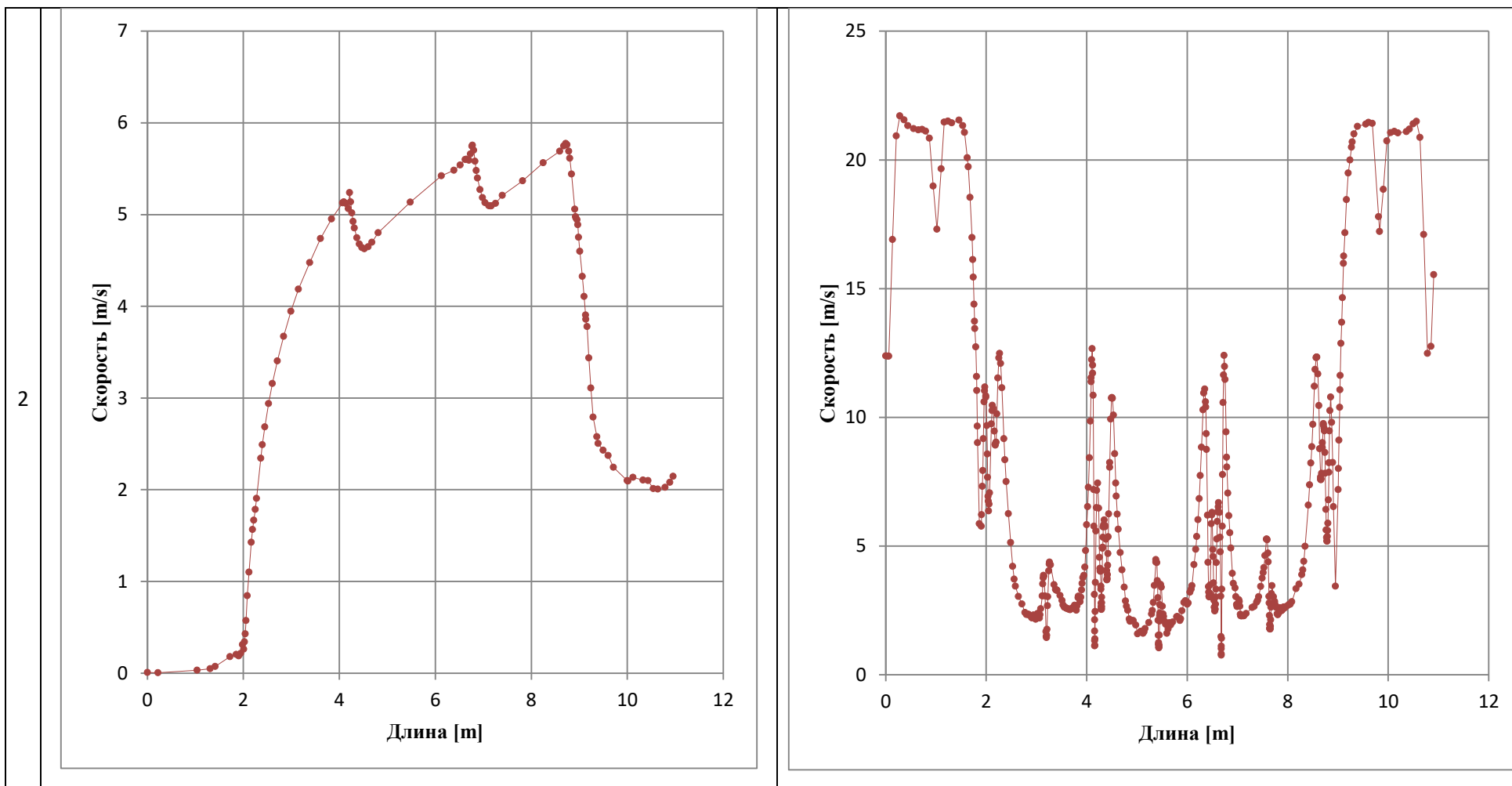
Таблица 4.18 – Сравнительный анализ параметров воздушной среды в классической модели и с учетом динамики сопряженных элементов



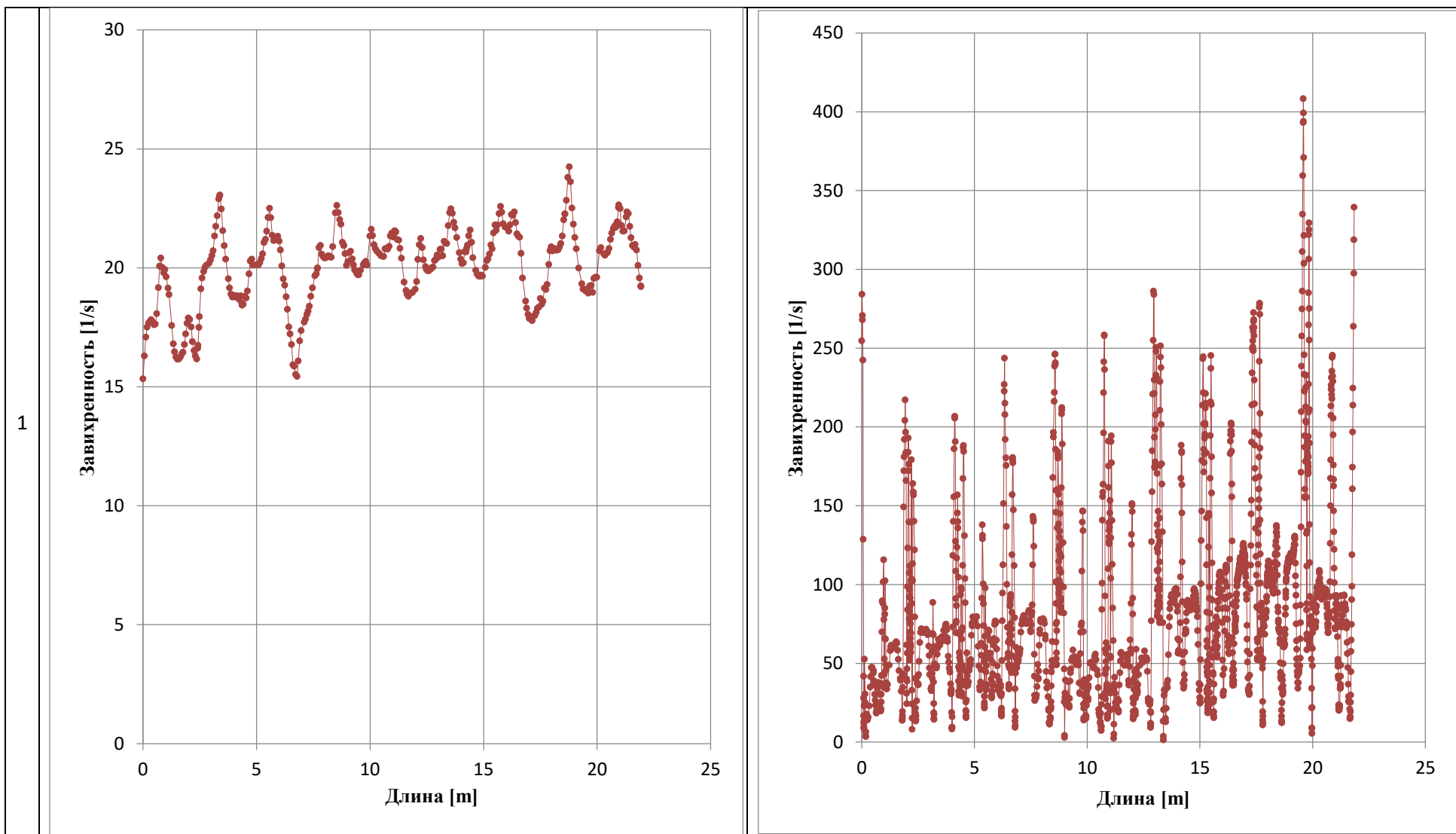


Сравнительный анализ по критерию давления воздушной среды в коридоре движения модели варианта шарнирно – сочлененного и жестко – сочлененного состава показывает незначительную разницу колебания давления (1...1,5 Па) среды. С боковым ветром – имеет место превышение среднего на 100 ± 60 Па для жесткой сцепки по сравнению с шарнирно – сочлененной. При наличии бокового ветра в средней части состава устанавливается и удерживается повышенное давление (более чем в 2 раза на головном и хвостовом обтекателях) вдоль всего состава. Давление среды составляет в среднем на 120 ± 80 Па меньше варианта с жесткой сцепкой. Такая разница объясняется общей упругой податливостью состава под действием внешней нагрузки, - образованием углов крена корпусов, тангажа и рыскания головного и хвостового вагонов. В результате, формируется конфигурация состава с более обтекаемыми формами по сравнению с жестким вариантом. Вместе с тем, образующаяся криволинейная форма состава составляет повышенное аэродинамическое сопротивление в осевом направлении.

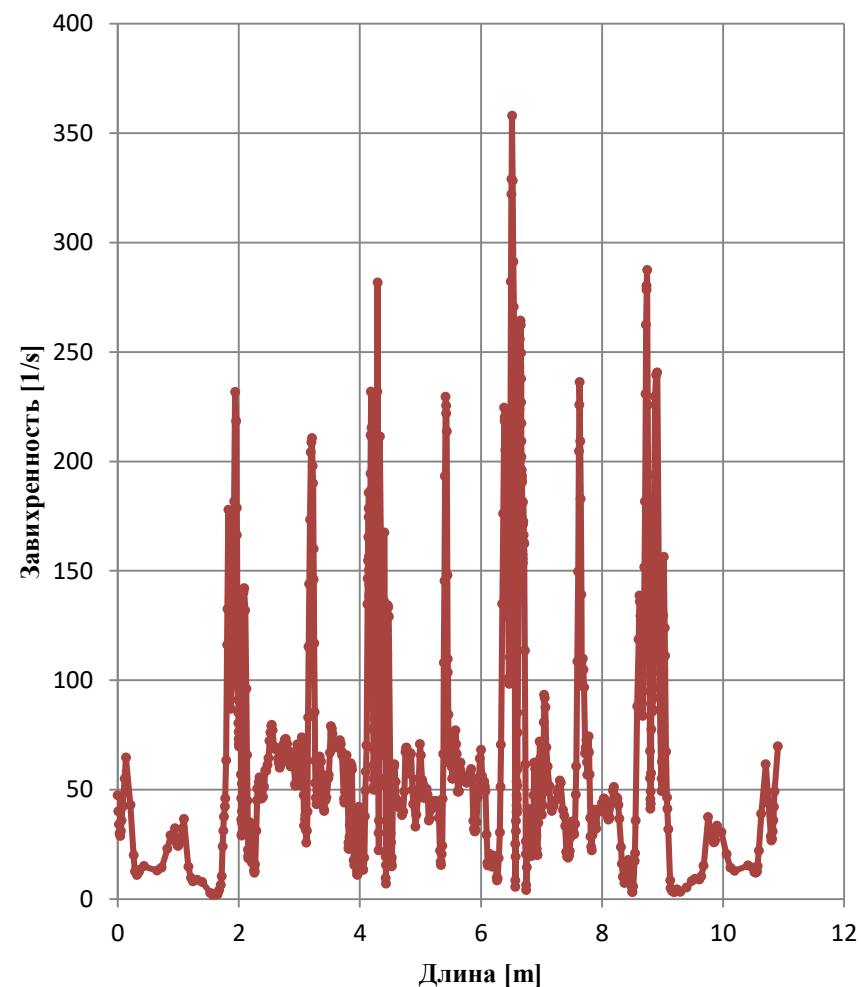
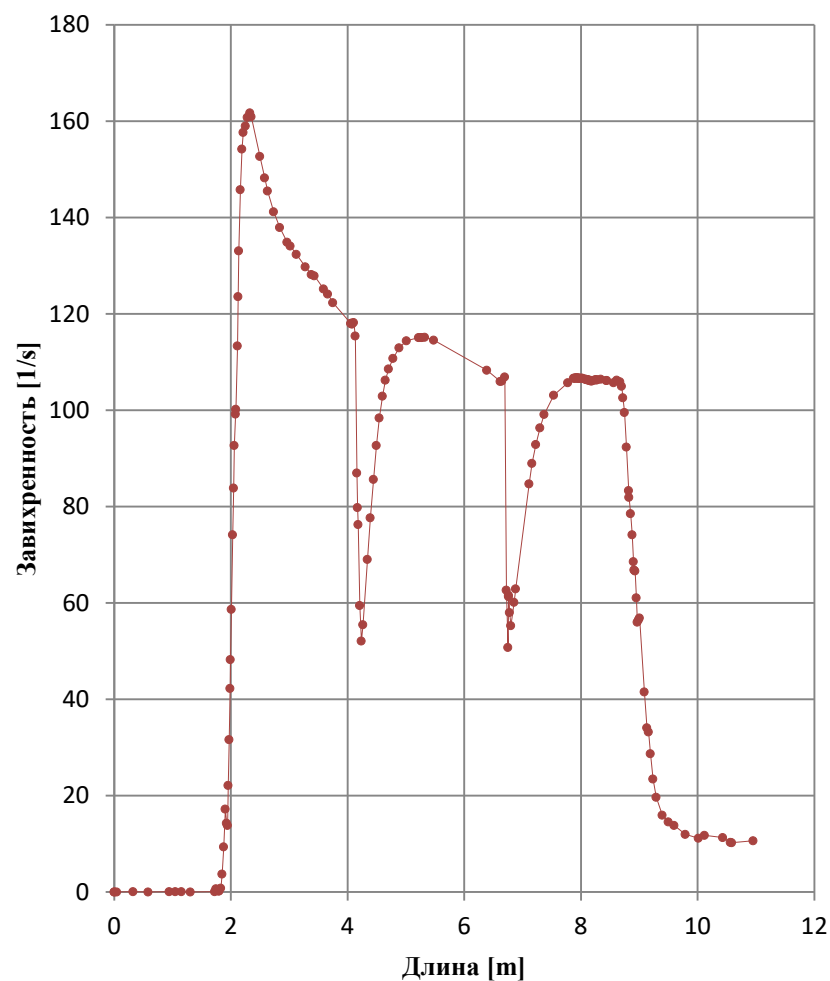




Модель шарнирно – сочлененного состава превышает по показателю скорости увлеченной воздушной среды в среднем в $2 \pm 0,5$ раза вариант с жестким соединением корпусов вагонов. При наличии бокового ветра имеют место возмущения параметра с интенсивностью более чем в 2 раза на головном и хвостовом обтекателях. В средней части состава колебания параметра аналогичны варианту с жёстким соединением вагонов. Рост показателя скорости также объясняется криволинейностью общей конфигурации состава в результате изменения крена и тангажа сопряженных корпусов состава.



2



В отношении завихренности следует отметить кратный (в 5 раз) рост показателя по длине состава для случая отсутствия бокового ветра. При наличии бокового ветра – характер колебаний параметра подобен.

Примечание: 1 – жесткое сопряжение вагонов; 2 – шарнирно – упругое сопряжение вагонов.

Применяемая при численном моделировании модель высокоскоростного электропоезда «Сапсан» (Velaro Rus) представляет собой жесткое твердое тело, в то время как в реальных условиях эксплуатации вагоны подвижного состава соединены упругим сцепным устройством, а также имеют в своей конструкции податливое рессорное подвешивание кузова и тележки. Следовательно, при движении корпуса вагонов могут иметь различающуюся пространственную ориентацию. Угловое отклонение корпуса вагона при высокоскоростном движении необходимо учитывать по нескольким ключевым причинам. При любом угловом отклонении кузова вагона его ориентация относительно набегающего потока воздуха изменяется, что приводит к перераспределению аэродинамических нагрузок, и в конечном счете может оказать влияние на устойчивость движения. Криволинейная форма конфигурации состава (со смещенным угловым положением концевых вагонов) становится более обтекаемой по сравнению с жестким вариантом при воздействии бокового ветра, и она же составляет повышенное аэродинамическое сопротивление в осевом направлении.

Таким образом, с одной стороны, пространственная ориентация кузова влияет на величину аэродинамических нагрузок, с другой – аэродинамическое воздействие при определённой интенсивности также может вызвать угловое отклонение кузова.

Для корректного учета воздействия ускоренных воздушных масс на корпус высокоскоростного подвижного состава необходимо учитывать угловое отклонение корпуса вагона вследствие податливости подвески и путевых сооружений в процессе движения поезда. Способствовать этому будет разработка многомассовой модели состава, представляющей собой комплекс, состоящий из нескольких инерционных масс (вагонов), соединенных различными типами механических связей.

Тем не менее, аэродинамические нагрузки не являются единственным фактором, вызывающим угловое отклонение кузова: при движении состава возникают колебательные процессы, обусловленные податливостью пути, рессорного подвешивания и других элементов вагона, а также мостовых ферм при прохождении состава через них.

Колебательные процессы, а также кривизна общего контура пути приводят к упругому взаимодействию вагонов, и как следствие – их вертикальному и поперечному (боковому) раскачиванию (рис 4.18).

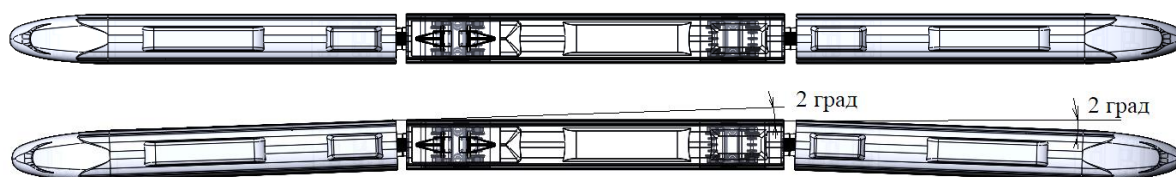


Рисунок 4.18 – Единоблочная жесткая модель поезда и шарнирно – сочлененная модель

Максимальное значение завихренности в обоих случаях имеет место на обтекательного головного вагона. Значение завихренности у шарнирно - сочлененной модели на 47 % оказывается ниже по сравнению с единоблочной жесткой модели. На единоблочной жесткой модели наблюдается интенсивное снижение уровня интенсивности в пределах габарита корпуса вагона, на шарнирно – сочлененной значении постоянное (рис. 4.19).

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, позволяющее минимизировать потенциальную энергию от воздействия набегающего потока воздушных масс.

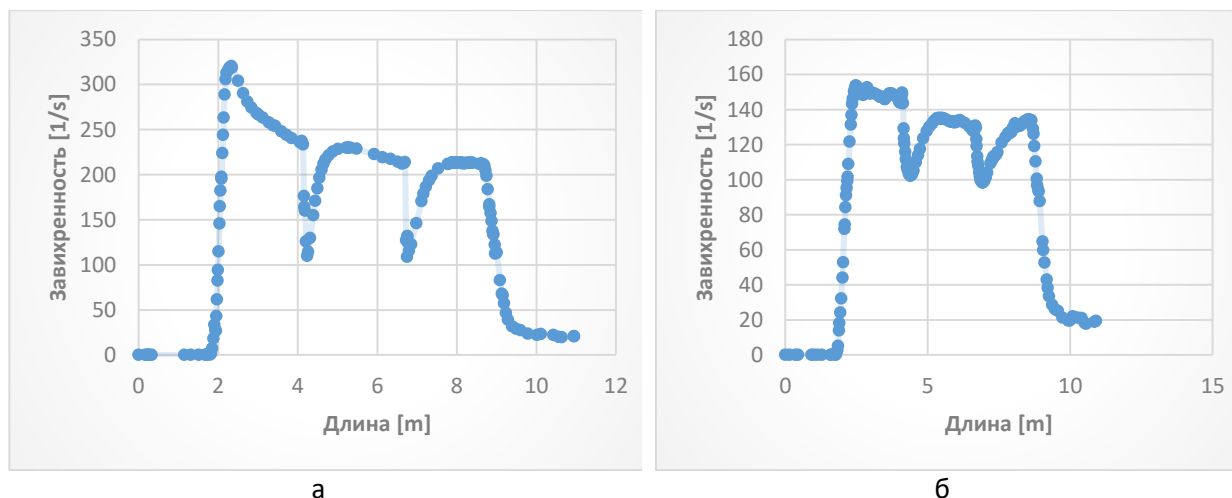


Рисунок 4.19 – Турбулентность воздушной среды в коридоре движения поезда: а - единоблочная жесткая модель; б - шарнирно – сочлененная модель

4.7. Полнофакторный компьютерный эксперимент определения динамики движения высокоскоростного подвижного состава по мостовому сооружению

Рассматриваемый объект представляет собой мост 2, установленный на свайных опорах 5, заглубленных в грунт. На мосту размещен рельсовый путь 3, представленный двумя фасонными балками, предназначенный для движения поездов 4 с высокими скоростями. Границы целика зафиксированы по торцам подвижной роликовой опорой. Рельсы нагружены сосредоточенными силами, расположенными в точках контакта поверхности катания головки рельса и обода колес тележек движущегося подвижного состава. Общий вид модели представлен на рисунке 4.20.

Особенностью данной задачи является факт формирования направленного импульса механических колебаний, излучаемых со стороны железнодорожного пути, а также моста и опор под воздействием движущейся, динамически изменяющейся во времени нагрузки со стороны поезда и набегających волн наличием фазовых переходов между мостом и опорами, а также опорами и грунтом.

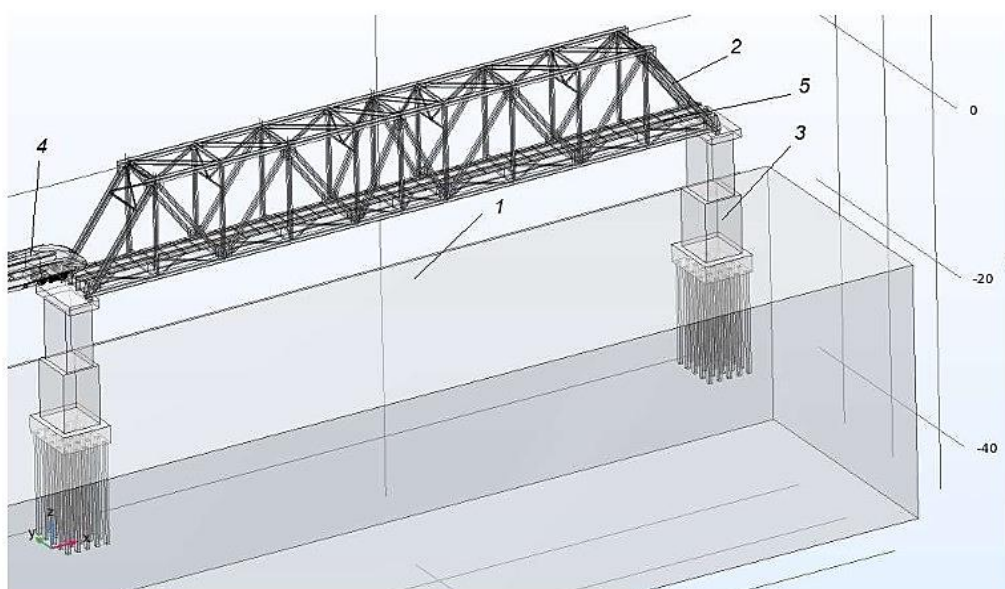


Рисунок 4.20 – Объект исследования: 1 – грунт; 2 – мост; 3 – опора на свайном основании; 4 – движущийся поезд; 5 – рельсовый путь

Для решения этой задачи необходимо реализовать следующий алгоритм (рис. 4.21):



Рисунок 4.21 – Алгоритм решения задачи

4.7.1. Постановка задачи исследования

Модель участка поверхности представляет собой прямоугольный параллелепипед с размерами 30 x 115 метров и высотой 30 м. С целью исключения влияния концевых эффектов опора размещена на 17 метров от края грунта в продольном направлении и на 12 метров в поперечном. Железнодорожный путь представлен в виде упрощенной модели, в которой отсутствует детализированное отображение рельса. Высота рельса соответствует типу Р75. Опоры представлены в виде твердых тел. Нижний срез сваи расположен на расстоянии 14 метров от дневной поверхности.

При моделировании приняты следующие упрощения и допущения (рис. 4.22):

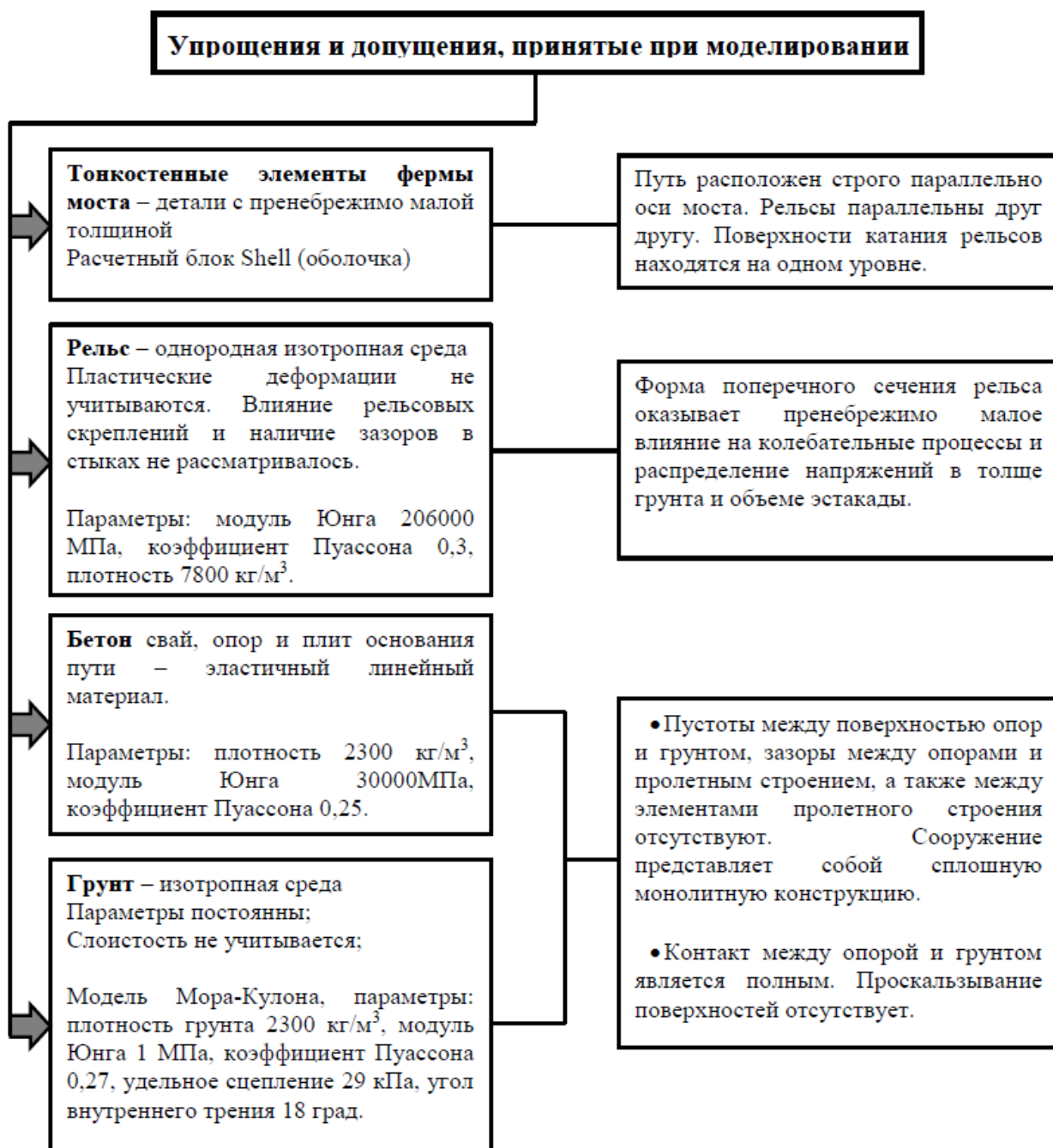


Рисунок 4.22 – Упрощения и допущения, принятые при моделировании

4.7.2. Расчет напряженно- деформированного состояния эстакады при действии динамических нагрузок от движущегося поезда

Расчета напряженно-деформированного состояния коллектора выполнен для случая движения скоростного поезда с осевой нагрузкой 18 тс. Расчет выполнен в программном пакете Comsol Multiphysics. При построении сетки конечных элементов использовано разбиение на тетраэдры. Общее число узлов сетки 1 123 000.

При расчете использованы следующие граничные условия:

1. Нижняя поверхность расчетной модели жестко закреплена. Использовано граничное условие *fixed constraint*.

2. К боковым поверхностям грунта, применено граничное условие роиковой опоры.

3. Распределение нагрузки на поверхность рельса от двухосной тележки как функция координаты имеет вид, представленный на рисунке 4.23 а). Для расчета динамически изменяющейся нагрузки, обусловленной движением поезда, применено граничное условие *Boundary load*, где распределение нагрузки задано в виде функции вида:

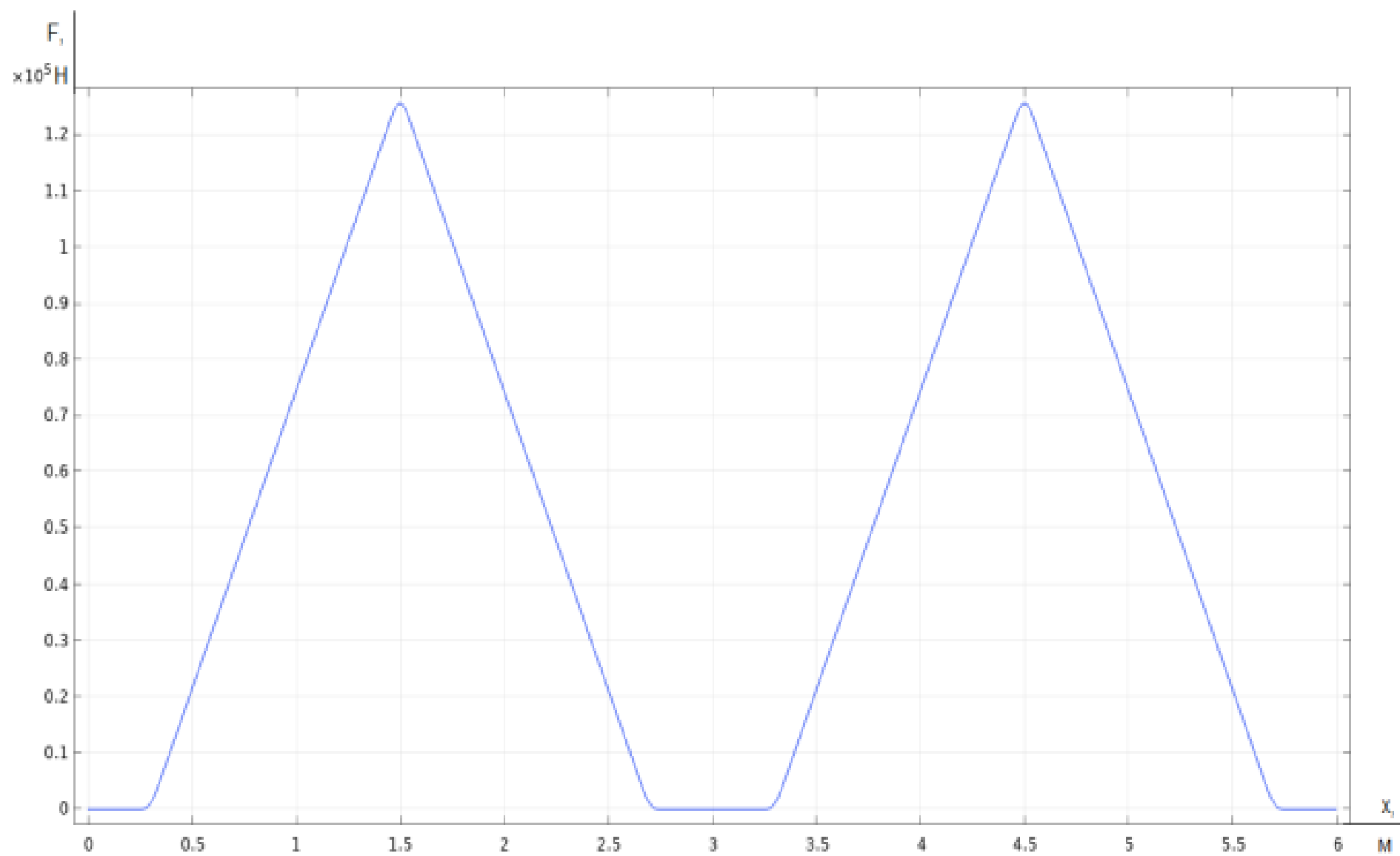
$$f(t) = F_{max}(x - Vt + x_0), \quad (4.1)$$

где F_{max} – амплитуда нагрузки на ось, V – скорость поезда, м/с, t – значение времени, с; x – координата вдоль оси рельса, м; x_0 – координата, м.

Кинематическая модель высокоскоростного пассажирского поезда «Сапсан» (Velaro Rus) рассматривается как плотка редуцированных массогабаритных моделей ходовых тележек подвижного состава. При этом среднее значение вертикальной нагрузки колеса на рельс принято согласно требованиям Правил расчёта пути [82, 84-86], а также ГОСТ Р 55513-2013 «Локомотивы» [92]. Функциональная зависимость нагружающего усилия верхнего строения пути получена в результате кинематического моделирования колебательного процесса надрессорной части подвижного состава с учётом условий контактирования обода колеса с поверхностью катания головки рельса [80, 81, 87-91, 93] и представляет собой граничное условие вида *Boundary load*. При выполнении расчетов амплитуда нагрузки на ось F_{max} принималась равной 250 кН, а значение скорости V составило 56 м/с. Применение указанного граничного условия позволяет моделировать движение поезда путем перемещения нагрузки вдоль рельсового пути с заданной скоростью. Для случая статического расчета в выражении (4.1) скорость и параметр времени задается равным нулю. Положение тележек поезда определяется значением координаты x . В качестве примера на рисунке 4.23 б) приведено распределение нагрузки на поверхность рельса от скоростного поезда.

Расчет выполнен в нестационарной постановке. Рассмотрен временной диапазон от 0 до 4 с, что соответствует времени прохода поезда по мосту с установленной скоростью. За начало отсчета принято время наезда первой колесной пары на рельс моста. Пример результата расчета полей деформации при взаимодействии высокоскоростного подвижного состава и моста после полного захода четвертого вагона (значение времени 1,9 с) представлено на рисунке 4.24.

a)



б)

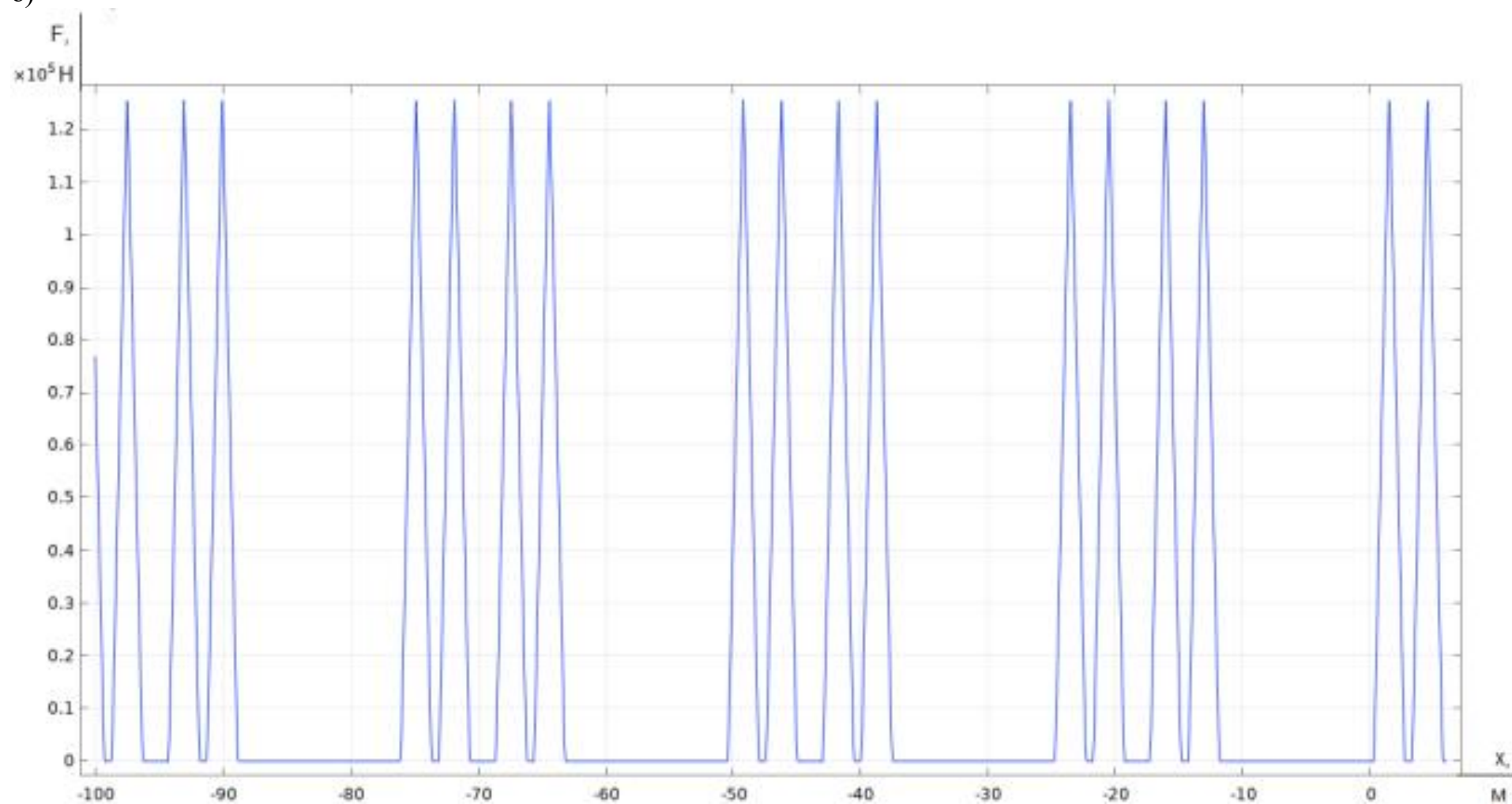


Рисунок 4.23 – Распределение нагрузки на поверхность рельса как функция координаты от модели двухосной тележки (а) и поезда (б)

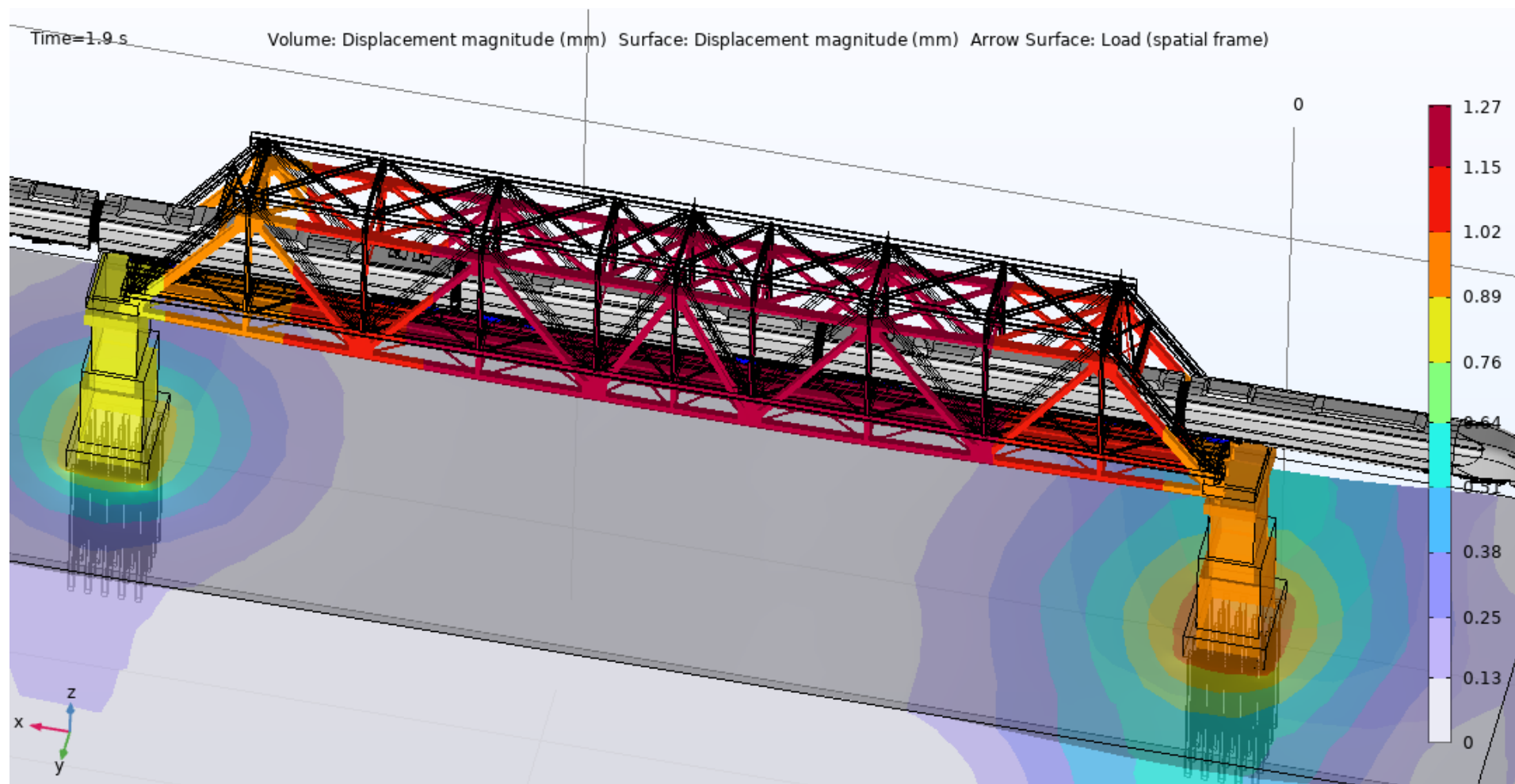


Рисунок 4.24 – Поле деформаций грунта и моста при воздействии нагрузок от поезда после полного захода четвертого вагона (значение времени 1,9 с)

Установлено, что деформации пролетного строения и грунта носят волновой характер, распространение фронта волн деформации, а значит и направление распространения энергии колебаний в грунте и мостовой конструкции. Выявлено явление интерференции колебаний грунта по прошествии 3,15 с после начала процесса.

Максимальные деформации получены при нахождении тележек трех вагонов на пролетном строении. В качестве иллюстрации на рисунке 4.25 представлено распределение напряжений по объему моста и грунта в момент времени 2,3 с.

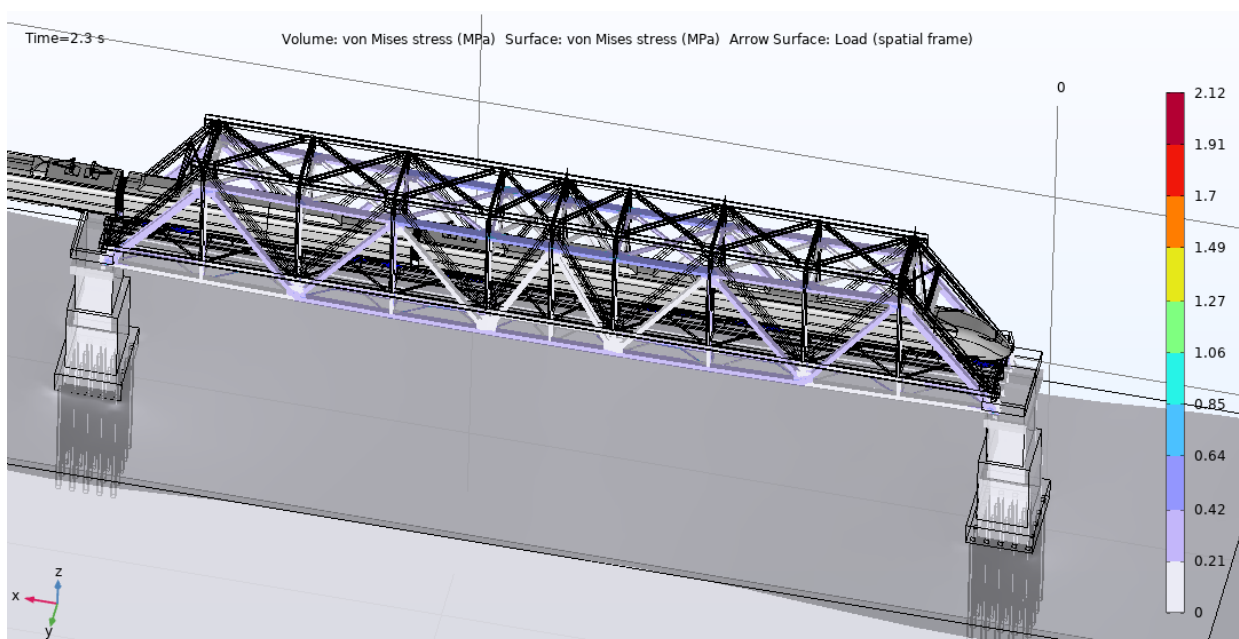


Рисунок 4.25 – Распределение напряжений в грунте и конструкции моста при воздействии нагрузок от поезда. Значение времени 2,3 с от момента въезда поезда на эстакаду, соответствует максимальной деформации конструкции

По результатам исследования распределения удельной энергии системы можно сделать вывод о тенденции резкого снижения интенсивности энергетических процессов, обусловленных наличием динамической нагрузки от движущегося поезда. Видно, что энергия от поезда с достаточной скоростью рассеивается в толще опоры и эстакады. Энергия волновых процессов передается на опору и затухает в направлении к основанию.

4.7.3. Расчет собственных частот колебательных процессов

Для оценки надежности сооружения [88, 89], информационно – достаточную картину представляет собой распределение модальных (эффективных)

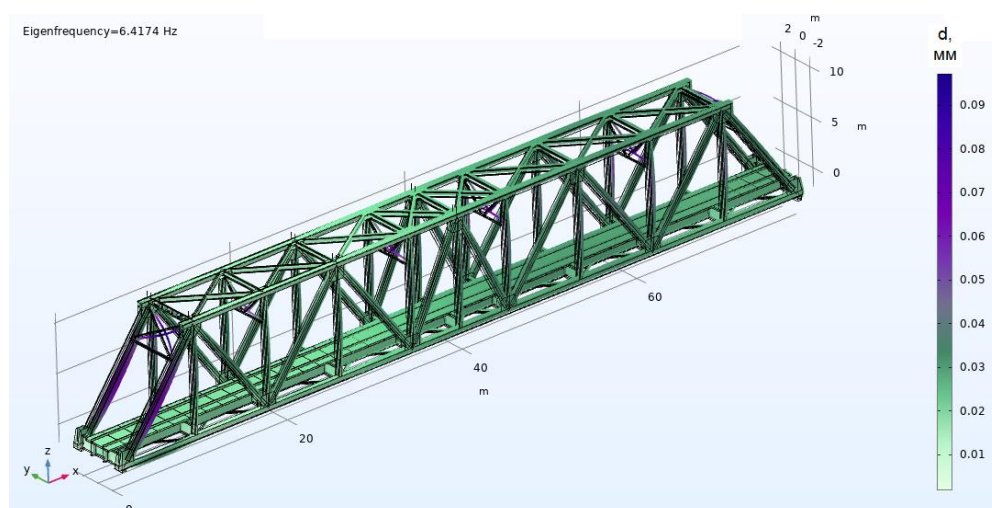
долей массы конструкции, участвующие в колебательном процессе на резонансных частотах. Расчет производится с помощью инструмента Eigenfrequency [87]. В результате расчета определены массы, вовлеченные в колебательный процесс по отведениям X, Y и Z m_{f_X} , m_{f_Y} и m_{f_Z} соответственно. Полученные значения были соотнесены с полной массой рассматриваемой колебательной системы. Относительные значения долей масс, участвующих в колебательном процессе для соответствующих значений значений модальных частот представлены в таблице 4.19.

Таблица 4.19 – Значения массовых долей, участвующих в колебательном процессе

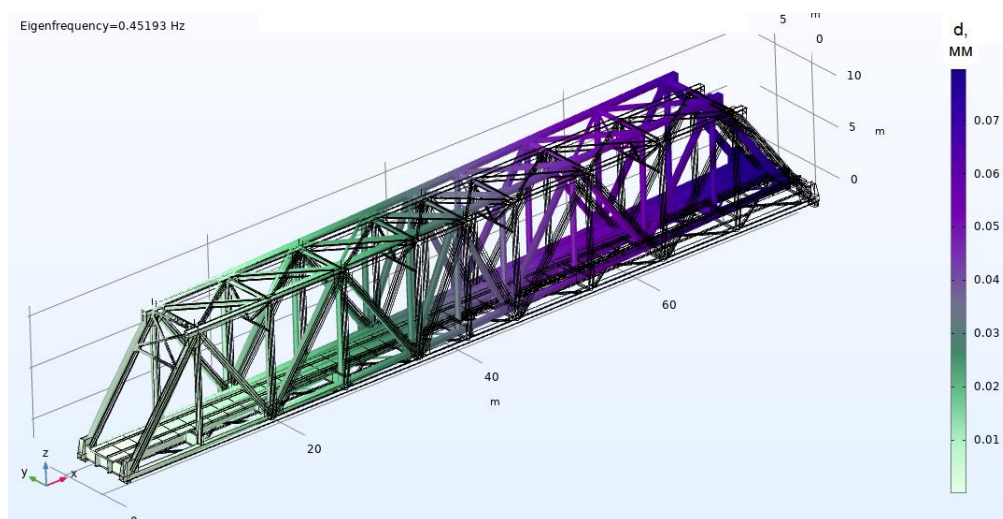
f, Гц	m_{f_X} , о.е.	m_{f_Y} , о.е.	m_{f_Z} , о.е.
0,45	2,52E-10	0,6820	2,37E-12
2,38	8,22E-08	0,1883	1,19E-06
3,31	4,64E-06	0,0242	6,99E-05
3,38	0,0738	9,78E-07	0,7425
5,18	5,89E-05	0,0125	5,29E-06
6,42	0,7694	4,18E-05	0,0345
6,60	0,0006	0,0248	2,46E-05
8,19	0,0064	0,0004	0,0002
8,32	0,0001	0,0007	1,92E-07
9,60	0,0407	2,07E-08	0,0002
10,26	1,37E-06	0,0092	5,44E-08
11,14	0,0061	2,52E-06	0,0006
12,00	0,0021	4,28E-05	3,93E-05
12,17	0,0001	5,61E-06	2,92E-05
	0,9055	0,9440	0,7787

В результате расчета определены значения резонансных частот, которым соответствуют наибольшие значения масс, вовлеченных в колебательный процесс, т.е. обладающие высокой энергией деформации, а именно: для отведения X – 6,42 Гц; для отведения Y – 0,45 Гц; для отведения Z – 3,38 Гц. Моды колебаний, соответствующие резонансным частотам представлены на рисунке 4.26.

a)



б)



в)

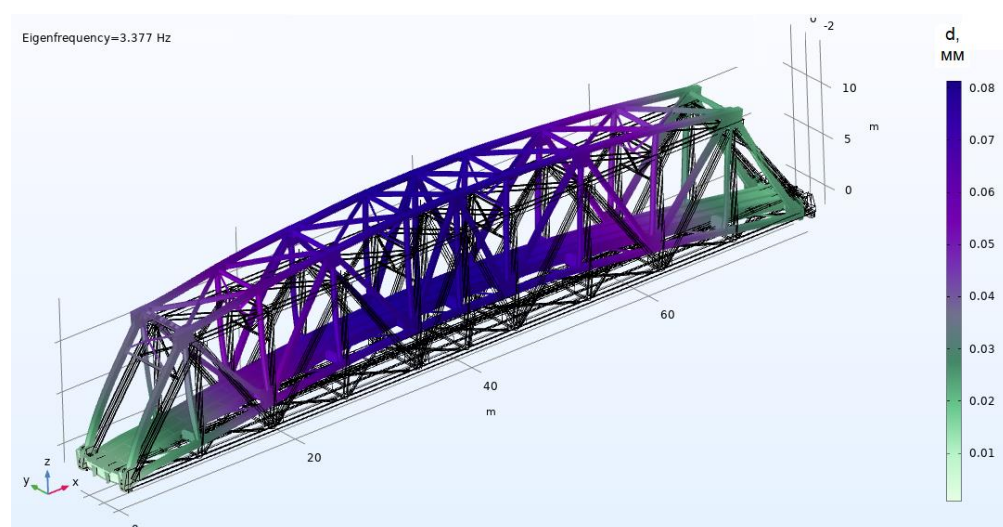


Рисунок 4.26 – Моды колебаний, соответствующие резонансным частотам моста: а – по отведению X ; б – по отведению Y; в – по отведению Z

Полученным модам колебаний при резонансных частотах соответствуют следующие амплитудные значения перемещений: по отведению $X - 0,1$ мм; по отведению $Y - 0,08$ мм; по отведению $Z - 0,08$ мм.

4.8.4. Определение критических скоростей

Результаты приведённых выше расчётов позволяют оценить критические скорости прохождения высокоскоростного подвижного состава, способные привести к возникновению механического резонанса системы.

Механический резонанс в системе «поезд – путь – мост» возникает в случаях, когда частота возмущающей силы, возникающей при движении ВСПС, совпадает с одной из собственных частот колебаний моста. В качестве такой возмущающей силы может выступать как периодическое воздействие тележек, так и динамические составляющие контактной нагрузки, вызванные действием аэродинамических факторов. При этом влияние аэродинамических факторов является наиболее значительным при наличии бокового ветра.

В общем случае критическую скорость можно определить, как:

$$V_{\text{крит } k} = f_{\text{nat } k} \cdot d,$$

где $f_{\text{nat } k}$, Гц – собственная частота пролётного строения по отведению k ; согласно результатам расчета напряженно-деформированного состояния пролётного строения, приведённым в разделе 4.8.3:

в осевом направлении $f_{\text{nat } X} = 6,42$ Гц,

в поперечном направлении $f_{\text{nat } Y} = 0,45$ Гц,

вертикальная $f_{\text{nat } Z} = 3,38$ Гц.

d , м – интервал между точками приложения возмущающей силы, в частности – расстояние между крайними осями колёсных пар вагона [4] (в рассматриваемом случае 20,36 м) или расстояние между пиковыми значениями аэродинамического параметра. Анализ приведённых в разделе 4.6 графиков аэродинамических параметров позволяет выделить основную (низкочастотную) и побочную (кратную, которая становится особенно заметна при сопоставлении графиков завихренности среды с графиками давления/скорости) гармоники,

однако в силу дискретности метода получен диапазон возможных значений интервала.

Данные расчёта удобно представить в виде графической зависимости (рис. 4.35). Анализ графической зависимости показывает (рис. 4.37), 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, что может говорить о возможном синергическом эффекте при некоторых конфигурациях системы и несомненно требует дальнейшего исследования.

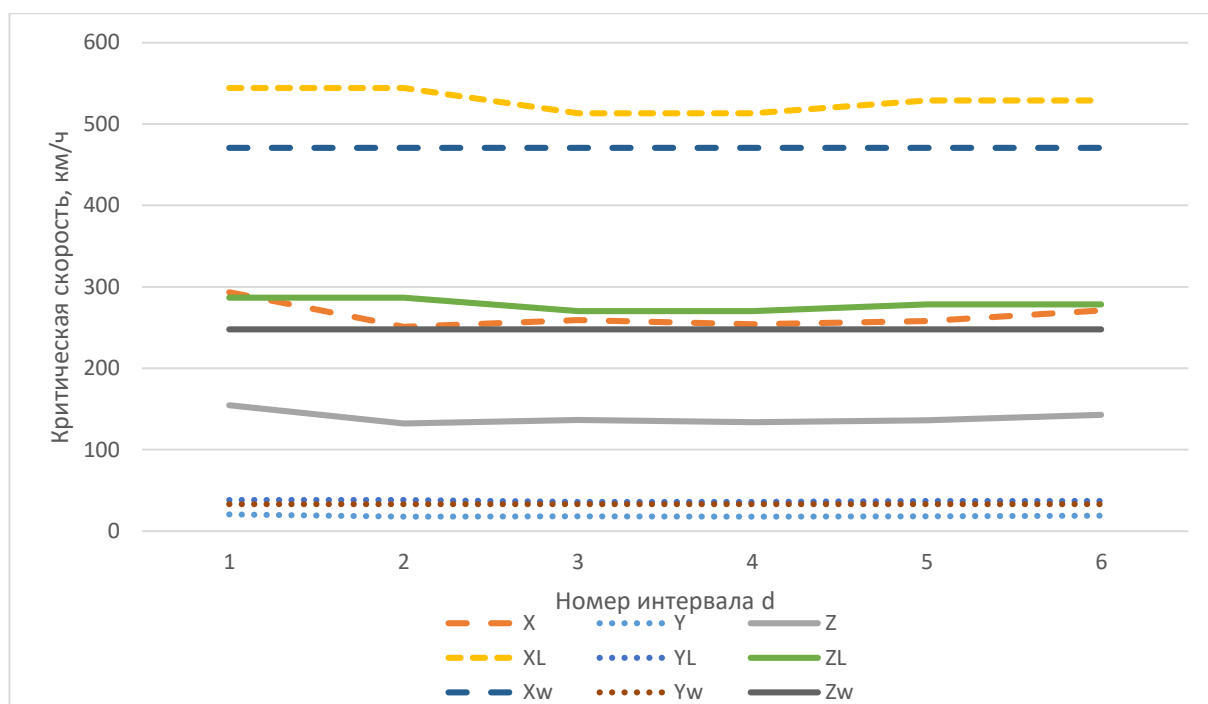


Рисунок 4.27 – Критические скорости для рассматриваемой конфигурации пролётного строения и ВСПС: X, Y, Z – критическая скорость ВСПС для колебаний по соответствующим отведениям, вызванных воздействием аэродинамических факторов на кратной частоте; XL, YL, ZL – критическая скорость ВСПС для колебаний по соответствующим отведениям, вызванных воздействием аэродинамических факторов на основной частоте; Xw, Yw, Zw – критическая скорость ВСПС для колебаний по соответствующим отведениям, вызванных воздействием тележек ВСПС

Выводы по главе 4

1. Применяемая при численном моделировании модель высокоскоростного электропоезда «Сапсан» (Velaro Rus) представляет собой жесткое твердое тело, в то время как в реальных условиях эксплуатации вагоны подвижного состава соединены сцепным устройством, а также имеют в своей конструкции рессорное подвешивание кузова и тележки.

2. Результаты натурного эксперимента позволяют точно провести валидацию построенной модели.

3. При движении корпуса вагонов могут иметь различающуюся пространственную ориентацию. Угловое отклонение корпуса вагона при высокоскоростном движении необходимо учитывать по нескольким ключевым причинам. При любом угловом отклонении кузова вагона его ориентация относительно набегающего потока воздуха изменяется, что приводит к перераспределению аэродинамических нагрузок, и в конечном счете может оказать влияние на устойчивость движения.

4. С одной стороны, пространственная ориентация кузова влияет на величину аэродинамических нагрузок, с другой – аэродинамическое воздействие при определённой интенсивности также может вызвать угловое отклонение кузова.

5. Аэродинамические нагрузки не являются единственным фактором, вызывающим угловое отклонение кузова: при движении подвижного состава, возникают колебательные процессы, обусловленные податливостью пути, рессорного подвешивания и других элементов вагона, а также мостовых ферм при прохождении состава через них.

6. Колебательные процессы, а также кривизна общего контура пути приводят к упругому взаимодействию вагонов, и как следствие – их вертикальному, поперечному и боковому раскачиванию, что негативным образом отражается на расходе энергии на тягу поезда.

7. Для корректного учета воздействия ускоренных воздушных масс на корпус высокоскоростного подвижного состава необходимо учитывать угловое отклонение корпуса вагона вследствие податливости подвески и путевых сооружений в процессе движения поезда. Способствовать этому будет разработка многомассовой модели состава, представляющей собой комплекс, состоящий из нескольких инерционных масс (вагонов), соединенных различными типами упруго-диссипативных связей.

8. При проектировании новых и оценке существующих пролётных строений необходимо производить расчёт их аэродинамического влияния на поток воздуха, увлекаемый поездом, с учётом скоростного режима движения высокоскоростного подвижного состава, для оценки риска возникновения периодических вихревых воздействий, способных вызвать резонанс.

9. Разработка и внедрение формализованной методики моделирования динамического воздействия на опоры и грунт с использованием граничных условий, позволяющих учитывать перемещающуюся нагрузку от поезда, а также оценивать характер распределения напряжений и деформаций в конструкции моста и прилегающем грунтовом массиве для оценки общего воздействия высокоскоростного подвижного состава с искусственными сооружениями транспортной инфраструктуры.

10. Результаты исследования показали, что максимальные ускорения и резонансные эффекты наблюдаются при завершении движения подвижного состава по пролётному строению. Это говорит о необходимости проведения оценки динамического поведения конструкции не только под нагрузкой, но и в момент её снятия. Рекомендуется включить в нормативы проектирования оценку разгруженного состояния пролётного строения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе «Моделирование динамики взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с объектами транспортной инфраструктуры при интенсивном воздействии 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 рас-

пределение 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Высокоскоростной железнодорожный подвижной состав:** коллективная монография / А. А. Андреев, А. А. Воробьев, А. М. Евстафьев [и др.]. – Санкт-Петербург: нп-принт, 2014. – 296 с. – ISBN 978-5-905942-59-4. – EDN TZJSTT.
2. **Исследование поперечной устойчивости высокоскоростного подвижного состава при выходе из тоннеля** / Д. Д. у. Каримов, А. А. Воробьев, А. С. Ватаев [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 2. – С. 115-135. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-2-115-135. – EDN TIARYO.
3. **Управление аэродинамическим взаимодействием высокоскоростного поезда с элементами искусственных сооружений тоннельного типа** / А. А. Воробьев, Д. Д. Каримов, К. А. Сотников, Н. В. Богданов // Транспорт Российской Федерации. – 2024. – № 1(110). – С. 62-68. – EDN ZYNJHE.
4. **Лазаренко, Ю. М.** Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении / Ю. М. Лазаренко, А. Н. Капускин // Вестн. ВНИИЖТа. – 2012. – № 4. – С. 11 – 14.
5. **Сюзюмова, Е. М.** Исследование воздушных потоков на пассажирской платформе при прохождении поезда / Е. М. Сюзюмова // Вестн. ВНИИЖТа. – 1973. – № 4. – С. 50 – 52.
6. **A Study of the Slipstreams of High-Speed Passenger Trains and Freight Trains** / M. Sterling, C. J. Baker, S. C. Jordon, T. Johnson // Proc. of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: J. of Rail and Rapid Transit. – 2008. – Vol. 222. – Iss. 1. – P. 177 – 193. doi: 10.1243/0954409-7jrrt133.
7. **Ламб, Г.** Гидродинамика / Г. Ламб. – Москва : ОГИЗ, 1947. – 929 с.
8. **Сагомонян, А. Я.** Проникание / А. Я. Сагомонян. – Москва : МГУ, 1974. – 299 с.
9. **Воробьев, А. А.** Математическое моделирование формирования «поршневого эффекта» в тоннельных сооружениях при движении железнодорожного подвижного состава / А. А. Воробьев, Н. В. Богданов //

Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2025. – Т. 22, № 1. – С. 121-133. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-1-121-133. – EDN FGNJEW.

10. Исследование поперечной устойчивости высокоскоростного подвижного состава при выходе из тоннеля / Д. Д. у. Каримов, А. А. Воробьев, А. С. Ватаев [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 2. – С. 115-135. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-2-115-135. – EDN TIARYO.

11. **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. – EDN BYEJEG.

12. Моделирование аэродинамической нагрузки на высокоскоростной состав / А. А. Воробьев, А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2025. – № 2. – С. 44-46. – EDN JBZHAC.

13. 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. – EDN POWALB.

14. Морозов В. И., Онищенко В. М., Пономарев А.Т. К моделированию бафтинга летательного аппарата // Изв. вузов. Авиационная техника, 1990. № 1. С. 84-87.

15. **Барченков А.Г.** Колебания плоских рам и балок под действием подвижных периодических сил / Барченков А.Г., Мальцев Р.И. // Сб. науч. тр. ВИСИ. – 1964. – № 10. – Вып. 1. – С. 60-89.

16. **Бокарев С.А.** Методика оценки грузоподъемности сталежелезобетонных железнодорожных пролетных строений / Бокарев С.А., Соловьев Л.Ю., Рогова Е.В. // Известия вузов. Строительство. № 3 - 4 (603-604) 2009. – С. 106-114.

17. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция

СНиП 2.05.03-84*, Москва, 2011.

18. **А.А. Воробьев** Математическое моделирование параметров контакта колеса с рельсом для различных условий эксплуатации вагонов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2016. – №1 (33). – С. 34–41.

19. Исследование напряженного состояния в контакте «колесо-рельс» при наличии выщербины / И.В. Федоров, А.А. Воробьев, И.К. Самаркина, О.А. Конограй, Т.Г. Бунькова// Известия Петербургского университета путей сообщения. - СПб., 2019.- №4.- С. 78-86.

20. Исследование напряженно-деформированного состояния колесной пары грузового вагона в процессе торможения / Крутько А.А., Седых Д.А., Воробьев А.А., Путинцева А.Р., Филиппов Ю.О. // Омский научный вестник. - Омск, 2019. - № 6 (168). - С. 15 - 20.

21. **Vorobev, A.A.** Study of the contact of the wheel with the rail for various conditions of freight car [Electronic resource] / A. A. Vorobev, O A Konogray, A. A. Krutko, I. I. Malakhov // 13th International Scientific and Technical Conference on Applied Mechanics and Systems Dynamics : conference proceeding (Omsk, 5 November 2019). – Omsk, 2019. – DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012127 DOCUMENT TYPE

22. Повышение эффективности эксплуатации колесных пар подвижного состава / О. С. Валинский, А.А. Воробьев, И.В. Федоров, О.А. Конограй, Э.Ю. Чистяков – Текст: непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2022. – №4-5 (101-102). – С. 30–35.

23. **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. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-1-7-18

24. **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.

25. ГОСТ 16350-80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей: государственный стандарт Союза ССР: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 17 декабря 1980 г. № 5857: введен впервые: дата введения 1981-07-01 / разработан Государственным комитетом СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. – 150 с. – Текст: непосредственный.

26. **Гребнев И.А.** Оценка влияния ветровых нагрузок на расход топливно-энергетических ресурсов в тяге грузовых поездов: специальность 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гребнев Иван Алексеевич; Российский университет транспорта РУТ (МИИТ). – Москва, 2024. – 154 с. – Текст: непосредственный.

27. Анализ воздействия гидродинамических факторов на береговые железнодорожные сооружения / А. А. Воробьев, В. С. Майоров, С. А. Краснобрыжий, А. В. Курков // Техник транспорта: образование и практика. – 2025. – Т. 6, № 1. – С. 83-90. – DOI 10.46684/2687-1033.2025.1.83-90. – EDN DKAКСR.

28. К вопросу о воздействии гидродинамических факторов на береговые железнодорожные сооружения / А. А. Воробьев, А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. – 2025. – № 1. – С. 119-130. – DOI 10.20295/2223-9987-2025-1-119-130. – EDN AKWKEJ.

29. **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.

30. Розы ветров: [сайт]. – URL: <https://lakka-sails.ru/winds/> (дата обращения: 07.06.2025). – Текст: электронный.

31. **Сладкова, Л. А.** Динамика подвижного состава и выбор параметров гасителей колебаний / Л. А. Сладкова, А. Н. Неклюдов // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19, № 4(95). – С. 13-20. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-4-2. – EDN JYOTRB.

32. **Крылов, В. В.** Установка для определения коэффициентов силы лобового сопротивления стрел кранов от действия ветровой нагрузки / В. В. Крылов, Л. А. Сладкова // Строительные и дорожные машины. – 2021. – № 3. – С. 22-25. – EDN NDJGRO.

33. **Крылов, В. В.** Методика определения коэффициентов силы лобового сопротивления стрел кранов от действия ветровой нагрузки / В. В. Крылов, Л. А. Сладкова // Строительные и дорожные машины. – 2021. – № 3. – С. 18-21. – EDN AOJMSW.

34. **Сладкова, Л. А.** Оценка параметров модели башни крана при действии ветровой нагрузки / Л. А. Сладкова, В. В. Крылов, Ф. А. Кузнецов // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: Материалы Международной научно-технической конференции, Тюмень, 08 февраля 2021 года / Под общей редакцией Ш.М. Мерданова. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. – С. 225-228. – EDN PFISBY.

35. Савоськин А. Н., Бурчак Г. П., Васильев А. П. Динамика тягового подвижного состава: Часть I. Конспект лекций по дисциплинам «Динамика систем», «Основы механики подвижного состава», «Механическая часть Э.П.С.» / Под ред. А. Н. Савоськина. – М.: РУТ (МИИТ), 2017. – 91 с. [Электронный ресурс]: <https://docplayer.ru/86797403-Dinamika-tyagovogo-podvizhnogosostava.html>. Доступ 12.01.2021.

36. 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. – DOI 10.20295/2223-9987-2024-04-103-111.

37. 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.

38. Цифровое моделирование аэродинамического взаимодействия подвижного состава с порталными сооружениями перевальных тоннелей / А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин, А. А. Воробьев, К. А. Сотников // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – № 2. – С. 104-123. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-2-104-123.

39. К вопросу снижения негативного эффекта воздействия аэродинамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами тоннельных сооружений / А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, А. С. Ватаев [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 590-599. – DOI 10.20295/1815-588X-2022-3-590-599.

40. Использование численного моделирования при анализе аэродинамического взаимодействия подвижного состава с тоннельными сооружениями / Н. В. Богданов, Я. С. Ватулин, А. А. Воробьев, К. А. Сотников // Бюллетень результатов научных исследований. – 2024. – № 1. – С. 65-73. – DOI 10.20295/2223-9987-2024-01-65-73.

41. **Воробьев, А. А.** Математическое моделирование формирования «поршневого эффекта» в тоннельных сооружениях при движении железнодорожного подвижного состава / А. А. Воробьев, Н. В. Богданов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2025. – Т. 22, № 1. – С. 121-133. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-1-121-133. – EDN FGJJEW.

42. **Каримов Д.Д.** угли Управление аэроупругим взаимодействием подвижного состава с элементами искусственных сооружений тоннельного типа: специальность 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: диссертация на соискание ученой степени кандидата техниче-

ских наук / Каримов Дастанбек Давронбой угли; Петербургский государственный университет путей сообщения. – Санкт-Петербург, 2023. – 134 с. – Текст: непосредственный.

43. **Каримов Д. Д. угли.** Численное моделирование аэродинамических процессов движения воздушных масс в тоннелях метрополитена с учетом «поршневого» воздействия подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2022. – Т. 19. – №1. – С. 17–27.

44. **Каримов Д. Д. угли.** Снижение воздействия воздушного потока на токоприемное устройство скоростного поезда с помощью аэродинамического обтекателя // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2022. – Т. 19. — №4. – С. 793–799.

45. **Полякова Екатерина Яновна.** Особенности аэродинамики подвагонного пространства высокоскоростного подвижного состава: специальность 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Полякова Екатерина Яновна; Петербургский государственный университет путей сообщения. – Санкт-Петербург, 2021. – 151 с. – Текст: непосредственный.

46. Высокоскоростной поезд Velaro для России / А. Липп, Д. Йон, Р. Манглер [и др.] // Железные дороги мира. – 2009. – № 1. – С. 36-50. – EDN VAQIGD.

47. Технические особенности высокоскоростного поезда Velaro RUS / В. А. Гапанович, А. С. Назаров, А. Н. Яговкин [и др.] // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2009. – № 1(5). – С. 37-49. – EDN KNNVNT.

48. Особенности оценки качества железобетонных конструкций транспортного строительства неразрушающими методами контроля / Т. М. Петрова, А. П. Лейкин, Э.Ю. Чистяков [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 1(42). – С. 46-51.

49. Пролетные строения железнодорожных мостов сталежелезобетонные высокой заводской готовности пролетам 18,2-45,0 м. Серия 3.501.9-151, 1989.

50. Сидорова Е.А., Певзнер В.О., Чечельницкий А.И. Показатели силового взаимодействия пути и подвижного состава при движении грузового вагона по длинным неровностям с учетом действия продольных сил. Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВЕСТНИК ВНИИЖТ). 2021;80(6):359-365. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-6-359-365>

51. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» (ТР ТС 001/2011) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standarts/technicalregulationses> (дата обращения: 01.06.2025).

52. **Алямовский, А. А.** SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.

53. **Алямовский, А. А.** Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation / А. А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.

54. **Петрова, Т. М.** К вопросу о коррозионной стойкости предварительно напряженной арматуры в транспортных конструкциях после длительной эксплуатации / Т. М. Петрова, А. В. Полетаев, Э. Ю. Чистяков // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 6(77). – С. 215-219. – DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-6-215-219.

55. **Гиргидов А.Д.** Механика жидкости и газа (гидравлика). Санкт-Петербург: СПб ГПУ, 2002. 544 с.

56. **Джаббаров, С. Т.** Движение тонкого осесимметрического тела в полупространстве, занятом сжимаемым газом / С. Т. Джаббаров // Проблемы механики. - 2016. - Вып. 1. - С. 12–17.

57. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 (утв. Приказом Минстроя России от 03.12.2016 № 891/пр) (ред. от 30.12.2020). – Текст : электронный // СПС КонсультантПлюс : [сайт]. – URL: <https://mchs.gov.ru/uploads/document/2022-03-15/079727a84b6dfc87f4f6c2db1a5693ed.pdf>.

58. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» (ТР ТС 002/2011) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standarts/technicalregulationses> (дата обращения: 01.06.2025).

59. NUCARS [электронный ресурс]. –Transportation Technology Center Inc Pueblo. – Colorado USA, 2017. — Режим доступа: <http://www.aar.com/nucars/>, свободный. — Загл. с экрана. — Яз. англ.

60. Crosswind Stability Evaluation of High-Speed Train Using Diferent Wind Models Mengge Yu1* , Rongchao Jiang1 , Qian Zhang1 and Jiye Zhang2 // Chinese Journal of Mechanical Engineering, Yu et al. Chin. J. Mech. Eng. (2019) 32:40 <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0353-7>.

61. Научно-исследовательский центр «Аэротехника» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.aero-tehnika.ru/index.php> – Дата обращения: 04.08.2024 г.

62. Eurocode EN 1991–2 Supersedes ENV 1991-3:1995 Incorporating corrigendum February 2010 – 164 p.

63. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» (ТР ТС 003/2011) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standarts/technicalregulationses> (дата обращения: 01.06.2025).

64. Взаимодействие пути и подвижного состава ЭВС "Сапсан" (проект Velaro RUS) / А.М. Бржезовский, С.В. Толмачев, Д.Н. Аршинцев, И.В. Смельянский // Вестник ВНИИЖТ, 2012, No1, с.3-8.

65. Высокоскоростные поезда Сапсан В1 и В2 // Учебное пособие. – Н.Ю. Богомолов и др. — М.: ОАО «Российские железные дороги», 2013. – 522 с. – ISBN: 978-5-89035-737-3

66. Общие сведения об электропоезде VELARO RUS «САПСАН» / Ширяев А.В., Слизов А.Ю. // Вестник ВЭЛНИИ, 2010, No2.

67. Техническое обслуживание поездов Сапсан – железнодорожный сервис от фирмы Сименс обеспечивает высокую эксплуатационную надежность

рельсового транспорта / Б. Бауманн // RTR Russian Edition, Сентябрь 2011, с.18-19.

68. 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. – DOI 10.20295/1815-588X-2021-1-121-131.

69. 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. – DOI 10.20295/1815-588X-2023-1-133-141.

70. Хайрер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально алгебраические задачи. – М.: Мир, 1999 – 685 с.

71. Butcher J.C. Numerical Methods for Ordinary Differential Equations. – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2008 – 463 p.

72. **Калиткин Н.Н.** Численные методы решения жестких систем // Математическое моделирование. – 1995 – Т. 7 – № 5 – С. 8–11.

73. **Чурков, Н. А.** Аэродинамика железнодорожного поезда. Принципы конструирования подвижного состава, минимизирующие воздействия воздушной среды на железнодорожный поезд / Н. А. Чурков. – Москва: Желдориздат, 2006. – 331 с. – ISBN 978-5-94069-013-9. – Текст: непосредственный.

74. **Чурков, Н. А.** Влияние боковой ветровой нагрузки на высокоскоростной подвижной состав / Н. А. Чурков, В. Г. Болдырев, И. Э. Чистосердова. – Текст: непосредственный // Динамика вагонов: сборник научных трудов / под ред. М. М. Соколова. – Ленинград: [б. и.], 1982. – С. 3–14.

75. **Крон, И. Р.** Расчетно-экспериментальный метод определения основного сопротивления движению грузовых вагонов с применением цифровых моделей : специальность 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата

технических наук / Крон Игорь Романович ; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург, 2023. – 136 с. – Текст: непосредственный.

76. **Кравец, В. В.** Аэродинамика частично перекрытого межвагонного пространства скоростного поезда / В. В. Кравец, Е. В. Кравец. – Текст: непосредственный // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2005. – № 8. – С. 61–69.

77. **Жигулин, Н. А.** Выбор модели поезда для решения задач статистической оценки топливно-энергетических ресурсов и управления движения поездов / Н. А. Жигулин, И. А. Гребнев, О. Е. Пудовиков. – Текст: непосредственный // Интернаука. – 2021. – № 3 (179). – С. 68–70.

78. L. Cremer and M. Heckl, Structure-Borne Sound, Springer-Verlag, New York, 1988.

79. Yang Y.B., Yau J.D. Corrigendum to "Resonance of high-speed trains moving over a series of simple or continuous beams with non-ballasted tracks" [Eng. Struct. 143 (2017) 295-305] // Engineering Structures. - 2018. - Vol. 171. - P. 1052-1053. - ISSN 0141-0296. - DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.06.032.

80. Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Кавказский В. Н. Моделирование динамического воздействия высокоскоростного подвижного состава на заглубленные сооружения тоннельного типа // Мир транспорта. 2023. Т. 21. No 6 (109). С. 72–84. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-9>.

81. Введение в COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс] URL: https://cdn.comsol.com/doc/6.0/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf дата обращения 14.03.2025.

82. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / Под ред. М. Ф. Вериго. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с. [Электронный ресурс]: <https://lokomotiv.ru/zheleznodorozhnyy-put/vzaimodeystvie-puti-i-sostava.html>. Дата обращения 15.06.2025.

83. **Ефимов С. В.** Лабораторные исследования работы продольных бортов плиты балластного корыта железобетонных пролётных строений с ездой на балласте на действие горизонтальной нагрузки // Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт-2016). – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2016. – С. 44 – 48. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28342638>. Дата обращения 17.06.2025.

84. **Лайрд Д.** Конечно-элементный анализ для всех. – Часть 2. [Электронный ресурс]: <http://sapr.ru/article/21944>. Доступ 14.03.2023.

85. 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.

86. **Шахунянц Г. М.** Железнодорожный путь. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с. [Электронный ресурс]: <https://vtome.ru/knigi/tehnika/453305-zheleznodorozhnyj-put-1987.html>. Доступ 14.03.2023.

87. COMSOL Multiphysics v 6.0 Reference manual. [Эл. ресурс] https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf дата обращения 13.01.2023 г. ComsolInc., 2021. – 1742 с.

88. De Corte W. The use of continuous high-frequency strain gauge measurements for the assessment of the role of ballast in stress reduction on steel railway bridge decks / W. De Corte, Ph. Van Bogaert. — DOI <https://doi.org/10.1784/insi.2006.48.6.352> // Insight — Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. — 2006. — Т 48, № 6. — С. 352– 356. — URL: <https://www.ingentaconnect.com/content/bindt/insight/2006/00000048/00000006/art00007>. Дата обращения: 10.04.2025.

89. Huan, Feng. 3D models of Railway Track for Dynamic Analysis. Master Degree Project. Stockholm, 2011. [Электронный ресурс]: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:467217/FULLTEXT01.pdf>. Дата обращения 15.05.2025.

90. СП 131.13330.2018 "СНиП 23-01-99* Строительная климатология" (в ред. Изменения № 3, утв. Приказом Минстроя России от 30.12.2020 N 897/пр.).

91 Справка по SolidWorks. – Текст : электронный // Dassault Systèmes : [сайт]. – URL: https://help.solidworks.com/2020/russian/SolidWorks/sldworks/r_help.htm

92. ГОСТ Р 55513-2013. ЛОКОМОТИВЫ Требования к прочности и динамическим качествам = Construction and Rolling stock clearance diagrams : межгосударственный стандарт : издание официальное : Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (от 26 августа 2013 г. № 536-ст) : внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 45 «Железнодорожный транспорт / разработан Всесоюзным научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ). – Москва : Российский институт стандартизации, 2013. – 42 с. – Текст : непосредственный.

93. 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. – 2025. – № 3(118). – С. 37-42.

94. Ikeda, M., Suzuki, M., Yoshida, K.: Study on optimization of panhead shape possessing low noise and stable aerodynamic characteristics. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute 47, 72–77 (2006).

95. Krajnovic, S., Ringqvist, P., Nakade, K., et al.: Large eddy simulation of the flow around a simplified train moving through a crosswind flow. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 110, 86–99 (2012).

96. Yu, M.G., Zhang, J.Y., Zhang, W.H.: Multi-objective optimization design method of the high-speed train head. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering) 14, 631–641 (2013).

97. Dorigatti, F., Sterling, M., Rocchi, D., et al.: Wind tunnel measurements of crosswind loads on high sided vehicle over long span bridges. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 107–108, 214–224 (2012).

98. Schober, M., Weise, M., Orellano, A., et al.: Wind tunnel investigation of an ICE 3 endcar on three standard ground scenarios. Journal of Wind Engineering and

Industrial Aerodynamics 98, 345–352 (2010).

99. 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, С. С. Носачева, Н. Ю. Шадрина [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I".

100. 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».

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
ДОКУМЕНТЫ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ПРАКТИЧЕСКУЮ
РЕАЛИЗАЦИЮ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 201861

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИМИТАЦИИ ПРОЦЕССА НАГРУЖЕНИЯ КОЛЕСА НА РЕЛЬС

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I" (RU)*

Авторы: *Воробьев Александр Алфеевич (RU), Носачева Светлана Сергеевна (RU), Шадрина Надежда Юрьевна (RU), Чистяков Эдуард Юрьевич (RU), Буянов Михаил Сергеевич (RU), Федорченко Александр Александрович (RU)*

Заявка № 2020127831

Приоритет полезной модели 19 августа 2020 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 15 января 2021 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 19 августа 2030 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021668716

**Программа расчета назначенного срока службы
цельнокатаных колес подвижного состава**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)
(RU)**

Авторы: **Воробьев Александр Алфеевич (RU), Федоров Игорь
Владимирович (RU), Чистяков Эдуард Юрьевич (RU), Козлов
Максим Николаевич (RU)**



Заявка № 2021667774

Дата поступления 08 ноября 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 19 ноября 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «НИЦ ВЕСТНИК НАУКИ»

ДИПЛОМ

I - СТЕПЕНИ ЛУЧШАЯ НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

награждается

ЧИСТЯКОВ ЭДУАРД ЮРЬЕВИЧ

Научная работа «МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК
НА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ЭСТАКАДАМ
В УСЛОВИЯХ ШТОРМОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ»

по результатам Международной научно-практической конференции

«АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ:
ТЕОРИЯ, МЕТОДОЛОГИЯ, ПРАКТИКА, ИННОВАТИКА»

(г. Уфа, 29 апреля 2025г.)

Главный редактор
«НИЦ Вестник Науки»
к.ф.-м.н. Халиков А.Р.



НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ПЕРВЫЙ ВЕСТНИК

№ К-546-22



www.perviy-vestnik.ru

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
**«Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I»
(ФГБОУ ВО ПГУПС)**

УТВЕРЖДАЮ
И.о. ректора

П.К. Рыбин
06 2025 г.



А К Т

24.06.2025 № 005,05,146/191

Акт внедрения результатов диссертационного исследования

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Чистякова Эдуарда Юрьевича по теме «Моделирование динамики взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с объектами транспортной инфраструктуры при интенсивном воздействии бокового ветра», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.9.3 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрофикация – внедрены в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» кафедрой «Электрическая тяга»:

1. Вид внедренных результатов: разработка научно-обоснованных технических и технологических решений по повышению энергоэффективности и безопасности в системе «подвижной состав – искусственные сооружения» в условиях интенсивного аэродинамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами транспортной инфраструктуры.

2. Форма внедрения: используются в учебном процессе кафедрой «Электрическая тяга» при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам: «Математические методы решения инженерных задач» и «Системы обеспечения безопасности эксплуатации высокоскоростного транспорта»

3. Внедрены: в учебный процесс по следующим дисциплинам:

– «Математические методы решения инженерных задач» – разработка повышения энергоэффективности и безопасности работы системы «подвижной состав – искусственное сооружение», в условиях интенсивного аэродинамического взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами транспортной инфраструктуры высокоскоростного подвижного состава;

– «Системы обеспечения безопасности эксплуатации высокоскоростного транспорта» – разработка технологических решений по линеаризации значения давлений воздушной среды по длине состава.

Начальник Учебного управления

Т.П. Сацук

Заведующий кафедрой «Электрическая тяга»

А.М. Евстафьев



**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ»
(ОАО «РЖД»)**

**ДИРЕКЦИЯ СКОРОСТНОГО
СООБЩЕНИЯ
СЕВЕРО-ЗАПАДНАЯ ДИРЕКЦИЯ
СКОРОСТНОГО СООБЩЕНИЯ**

поселок Металлострой,
участок ж.д. «река Славянка – ЛЭП»,
г. Санкт-Петербург, 196641,
тел.: (812) 458-29-70, факс: (812) 458-29-70
e-mail: sekretar.szdos@mail.ru, www.rzd.ru

14 июня 2015 г. № ИЖК-3938/С-ЭДООС

На № _____ от _____

СПРАВКА

о внедрении результатов исследования

Результаты диссертационной работы старшего преподавателя федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС) Чистякова Эдуарда Юрьевича на тему: «Моделирование динамики взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с объектами транспортной инфраструктуры при интенсивном воздействии бокового ветра», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.9.3 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификации, внедрены в процесс проектно-исследовательской и эксплуатационной деятельности Северо-Западной дирекции скоростного сообщения ОАО «РЖД» и используются:

- при проектировании и эксплуатации высокоскоростного подвижного состава с целью повышения энергоэффективности и безопасности работы системы «подвижной состав – искусственное сооружение», в условиях интенсивного аэродинамического взаимодействия с элементами транспортной инфраструктуры;
- при изучении особенности перераспределения 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»;

– при разработке технологических решений и рекомендаций, позволяющих 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.

Главный инженер

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned between the title 'Главный инженер' and the name 'В.В.Иванов'.

В.В.Иванов