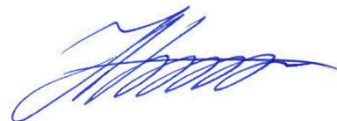


На правах рукописи



Лабутин Никита Андреевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ПЕШЕХОДНЫХ ПУТЕПРОВОДОВ
НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ
ОТ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ**

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и
транспортных тоннелей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Научный руководитель

Смирнов Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Мосты» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Официальные оппоненты:

Овчинников Игорь Георгиевич

засуженный деятель науки РФ, действительный член Российской академии транспорта, доктор технических наук, профессор базовой кафедры «АО Мостострой-11» ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень

Саленко Сергей Дмитриевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Аэрогидродинамика» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», г. Новосибирск.

Защита состоится «26» декабря 2024 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета У.2.1.8.04 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус ГК-2, аудитория 411).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (www.spbstu.ru).

Автореферат разослан « » ноября 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.2.1.8.04,
к.т.н., доцент



Радаев А. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие сети высокоскоростного железнодорожного транспорта входит в перечень наиболее приоритетных направлений Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года и национального проекта «План комплексной модернизации и расширения магистральной инфраструктуры». Также в настоящее время осуществляется проектирование и строительство первой российской высокоскоростной железнодорожной магистрали ВСЖМ-1 Санкт-Петербург – Москва.

Объекты инфраструктуры высокоскоростных магистралей (ВСМ) требуют учета на стадии проектирования некоторых специальных воздействий, характерных для высокоскоростных магистралей. Одним из таких воздействий является аэродинамическое воздействие от движущегося высокоскоростного поезда. Как следует из аэродинамической теории, величина скоростного напора ветрового потока прямо пропорциональна квадрату его скорости. Таким образом, воздействие от ветрового потока, создаваемого движущимся высокоскоростным поездом, становится сопоставимым с воздействием на здания и сооружения при ураганном ветре и даже превышающим его. Одними из наиболее подверженных аэродинамическому воздействию объектов инфраструктуры являются пролетные строения пешеходных путепроводов, характеризующиеся сравнительно малой массой и жесткостью, а также непосредственной близостью к движущемуся поезду. Однако, аэродинамическое воздействие движущихся высокоскоростных поездов на пролетные строения пешеходных путепроводов имеет недостаточный уровень изученности, что приводит к невозможности осуществления рационального и качественного проектирования данных сооружений, что, в свою очередь, обуславливает актуальность настоящего исследования.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиям аэродинамического взаимодействия движущегося поезда и воздушной среды посвящено большое количество работ как зарубежных, так и отечественных ученых. Значительный вклад в исследование аэродинамики подвижного состава внесли В. И. Лопушинский, Н. А. Чурков (ЛИИЖТ), П. Н. Астахова, Г. А. Романенко, Е. И. Сюзюмова (МГУ), А. К. Воронин, А. Г. Захаров, (ЦАГИ), С. J. Baker, D. Soper, A. Orellano, J. Shetz, Xiao-Hui Xiong, Kai-Wen Wang и Xiao-Zhen Li. Непосредственно исследованиям аэродинамического воздействия на инфраструктуру высокоскоростных магистралей посвящено существенно меньшее количество исследований, преимущественно направленных на исследование воздействия на шумо- и ветрозащитные экраны а также исследование ветровой устойчивости высокоскоростных поездов при движении на мостах или высоких насыпях. Отдельного внимания заслуживают работы С. J. Baker, D. Soper, M. Thomas, M. Reiterer, B. Hoffmeister, Н. А. Чуркова (ЛИИЖТ, ПГУПС), Ю. М. Лазаренко и А. Н. Капуксина. С. И. Дубинского (ВНИИЖТ) и научного коллектива ЦАГИ в составе С. Ф. Коновалова, М. А. Швецова, А. В. Катунина и А. Б. Айрапетова. Из отечественных исследований последних лет заслуживают внимания работы Б. О. Полякова и Е. Я. Ватулиной (ПГУПС).

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей, пункты: 6. «Совершенствование методов расчета конструкций, сооружений и их элементов: земляного полотна, пути, оснований, опор, дорожного и аэродромного покрытий, пролетных строений, защитных покрытий, тоннельной обделки, несущих, подпорных и ограждающих конструкций, средств организации движения, водопропускных труб, галерей и т.п., на статические и динамические воздействия природного и техногенного происхождения, включая расчеты напряженно-деформированного состояния и водно-теплого режима, грунтовых массивов, металлических, бетонных и железобетонных конструкций, гидравлического и ледового режимов акваторий мостовых переходов», 8. «Вопросы развития и совершенствования нормативной базы отрасли, проектирования, строительства, эксплуатации и реконструкции транспортных сооружений».

Целью диссертационной работы является совершенствование методов расчета пролетных строений пешеходных путепроводов над путями высокоскоростных железнодорожных магистралей на аэродинамическое воздействие от движущихся поездов для обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности их функционирования.

Научная задача исследования заключается в разработке и усовершенствовании существующих методов расчета пролетных строений пешеходных путепроводов на аэродинамическое воздействие от движущихся поездов для обеспечения их рационального и качественного проектирования, а также безопасной и комфортной эксплуатации.

Для достижения поставленной цели были определены и решены следующие основные задачи:

- экспериментальные исследования аэродинамических нагрузок от движущегося подвижного состава на объекты инфраструктуры железнодорожных магистралей;
- разработка численной верифицированной модели взаимодействия элементов системы «пролетное строение – воздушная среда – движущийся поезд»;
- исследование распределения действующих на пролетные строения пешеходных путепроводов сил и давлений, вызванных аэродинамическим воздействием от движущегося высокоскоростного поезда;
- разработка усовершенствованного метода определения эквивалентных нагрузок на пролетные строения пешеходных путепроводов от аэродинамического воздействия высокоскоростных поездов;
- разработка усовершенствованного метода расчета пролетных строений на аэродинамическое воздействие от высокоскоростных поездов.

Объект исследования – пролетные строения пешеходных путепроводов над путями высокоскоростных железнодорожных магистралей со скоростями движения до 420 км/ч.

Предмет исследования – методы расчета пролетных строений пешеходных путепроводов на восприятие аэродинамического воздействия от движущихся высокоскоростных поездов.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основами при решении поставленных задач исследования послужили современные положения теории надежности, теории колебаний и динамики сооружений, а также газодинамической теории. При планировании и обработке результатов экспериментальных исследований были применены методы теории планирования эксперимента и статистической обработки данных. Теоретическое исследование взаимодействия элементов системы «пролетное строение – воздушная среда – движущийся поезд» выполнено методами численного моделирования с применением сертифицированных программных комплексов, оперирующих методами конечных элементов и методами вычислительной гидрогазодинамики (метод конечных объемов).

Достоверность результатов подтверждается использованием при выполнении экспериментальных исследований сертифицированного и поверенного измерительного оборудования, применением при исследованиях на численных моделях сертифицированных программных комплексов, верификацией разработанных численных моделей, а также согласованностью результатов исследования и их воспроизводимостью.

Научная новизна настоящего исследования заключается в том, что усовершенствованные методы определения эквивалентных нагрузок и расчета пролетных строений пешеходных путепроводов на аэродинамическое воздействие от высокоскоростных поездов, в отличие от существующих методов, учитывают не только подъемную (вертикальную), но и продольную (горизонтальную) составляющую аэродинамического воздействия, а также условия динамической комфортности пребывания людей на сооружении, что позволяет обеспечить требуемую безопасность, надежность и долговечность пролетных строений пешеходных путепроводов.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованный метод определения эквивалентных нагрузок, действующих на пролетные строения пешеходных путепроводов при аэродинамическом воздействии от движущихся высокоскоростных поездов.

2. Усовершенствованный метод расчета пролетных строений пешеходных путепроводов на восприятие аэродинамического воздействия от движущихся высокоскоростных поездов.

3. Аналитическая модель распределения действующих на пролетные строения пешеходных путепроводов сил и давлений, вызванных аэродинамическим воздействием от высокоскоростного поезда, а также зависимость между шириной поперечного сечения пролетных строений пешеходных путепроводов и величиной аэродинамических сил, действующих на сооружение.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в совершенствовании и дополнении существующих методов расчета пролетных строений пешеходных путепроводов на аэродинамическое воздействие от

высокоскоростных поездов и установлении функциональных зависимостей величины аэродинамической силы, действующей на сооружение, от ширины поперечного сечения пролетного строения.

Практическая значимость результатов исследования заключается в разработке рекомендаций по численному моделированию аэродинамического воздействия и мероприятий по снижению динамического отклика конструкции на рассматриваемое воздействие, включающих в себя рекомендации по назначению конструктивных решений пролетных строений, установке аэродинамических экранов и динамических гасителей колебаний.

Внедрение результатов исследования. Основные результаты диссертационного исследования были использованы при выполнении работ по: разработке Специальных технических условий «Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург (ВСЖМ-1)», (ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023 г.); научно-техническому сопровождению проектирования вокзальных комплексов по объекту «Создание высокоскоростной железнодорожной магистрали Санкт-Петербург – Москва (участок Крюково (Алабушево) – Обухово)», (ООО «Инженерное бюро искусственных сооружений, 2023 г.); разработке проектной документации по объекту «Создание высокоскоростной железнодорожной магистрали Санкт-Петербург – Москва (участок Крюково (Алабушево) – Обухово). 1 этап – строительство участка Обухово-2 (искл.) – Великий Новгород ВСМ (вкл.). Эстакада на участке 18 км – 37 км. Железнодорожные путепроводы с индивидуальными пролетными строениями» (ООО «Инженерное бюро искусственных сооружений, 2023 г.); научно-техническому сопровождению «Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург (ВСЖМ-1)», (ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024 г.).

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии во всех этапах диссертационного исследования: постановке цели и научной задачи исследования; постановке и определении способов решения задач исследования; выполнении оценки и анализа существующих методик учета нагрузок на пролетные строения от аэродинамического воздействия движущихся поездов, проведении экспериментального исследования, в том числе разработке плана эксперимента, выполнении измерений и обработке их результатов; разработке аналитической модели распределения экстремальных давлений, действующих на пролетные строения пешеходных путепроводов; разработке усовершенствованных методов определения эквивалентных нагрузок на пролетное строение от аэродинамического воздействия высокоскоростного поезда и его расчета на рассматриваемое воздействие.

Апробация результатов работы. Основные и промежуточные результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: Международный транспортный форум «TransSiberia 2021» (ФГБОУ ВО СГУПС, 2021 г.); III Международный Бетанкуровский форум (ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021 г.); Международная конференция «Новые технологии в мостостроении. Приоритеты 2030» (НТМП-2030, ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022 г.);

LXXXII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя Науки» (ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022 г.); Международная конференция «Civil Engineering Conference» (СЕС 2022), Словакия; V Международная научно-практическая конференция «Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (РИЛТТРАНС-2023)» (ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023 г.); Международная научно-практическая конференция «Исследование, проектирование, строительство и эксплуатация мостов: проблемы и пути их решения на протяжении жизненного цикла» (ФГБОУ ВО СГУПС, СибНИИ Мостов, 2023 г., 2024 г.);

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 14 научных статей, из которых 5 – статьи, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикации результатов диссертационных работ, 2 – в сборниках конференций, индексируемых в Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем составляет 226 страниц, работа содержит 213 рисунков и 15 таблиц. Список литературы содержит 241 источник, из которых 122 – на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяются цели и задачи исследования, обосновывается научная новизна, приводится практическая и теоретическая значимость, а также перечисляются основные научные и практические результаты.

В первой главе приводятся результаты практико-теоретического анализа актуальных тенденций развития высокоскоростных железнодорожных магистралей и конструктивных решений пролетных строений пешеходных путепроводов над железнодорожными путями. Выполняется оценка действующих методик учета аэродинамического воздействия высокоскоростных поездов на пролетные строения и анализ возможных методов исследования аэродинамического взаимодействия элементов системы «пролетное строение – воздушная среда - движущийся поезд».

Основными тенденциями развития наземного высокоскоростного транспорта являются постоянное увеличение эксплуатационной скорости движения поездов и строительство отдельных специализированных высокоскоростных магистралей, полностью исключаящих одноуровневые пересечения. Проектирование и строительство таких магистралей сопровождается необходимостью учета некоторых специальных воздействий, характерных только для высокоскоростного движения. Одним из таких воздействий является аэродинамическое воздействие движущихся высокоскоростных поездов на объекты инфраструктуры магистрали.

Одними из наиболее подверженных данному воздействию объектов инфраструктуры являются пролетные строения пешеходных путепроводов над железнодорожными путями, что обусловлено их сравнительно малой массой и жесткостью, большой наветренной площадью и непосредственной близостью к

движущемуся поезду. Применение алюминиевых сплавов и композитных материалов в конструкциях пролетных строений, являющееся одним из наиболее перспективных направлений в мостостроении, еще больше увеличивает их подверженность аэродинамическому воздействию. Малая масса алюминиевых и полимеркомпозитных пролетных строений способствует повышению их чувствительности к динамическим и аэродинамическим воздействиям.

Выполненный анализ и оценка действующих отечественных и зарубежных методов расчета объектов инфраструктуры высокоскоростных магистралей на аэродинамическое воздействие от высокоскоростных поездов свидетельствует об их недостаточности для выполнения расчетов пролетных строений пешеходных путепроводов. Существующие методы не позволяют выполнять их качественное и рациональное проектирование в силу отсутствия характерных расчетных случаев и алгоритмов выполнения расчетов.

Для определения наиболее рационального метода исследования взаимодействия элементов системы «пролетное строение – воздушная среда – движущийся поезд» выполнен анализ существующих методов исследования аэродинамических процессов. Поскольку моделирование аэродинамического воздействия движущегося поезда на неподвижный объект является нереализуемым в аэродинамических трубах и возможно только на специальных стендах, в качестве способа исследования было определено численное моделирование в специализированных программных комплексах вычислительной гидрогазодинамики. Метод численного моделирования позволяет перейти к исследованию «виртуальных» полномасштабных моделей.

Во второй главе рассмотрены результаты экспериментального исследования аэродинамических нагрузок от движущихся поездов на объекты инфраструктуры железнодорожных магистралей. Определены факторы и функции отклика экспериментальных исследований, произведены обоснование области факторного пространства и анализ результатов экспериментальных измерений.

Основной целью экспериментальных исследований являлось выявление распределения воздушных масс вокруг движущегося поезда для различных видов подвижного состава, оценка влияния геометрической формы подвижного состава на величину интенсивности давлений, создаваемых движущимся поездом, и установление динамического характера воздействия давлений, вызванных движущимся поездом, на объекты инфраструктуры. Также целью экспериментальных исследований являлось формирование структурированного набора данных для последующей верификации численной модели взаимодействия элементов системы «пролетное строение – воздушная среда – движущийся поезд».

В качестве изменяемых факторов экспериментальных измерений были установлены: расстояние от датчика до оси пути, высота датчика над уровнем головки рельса, тип подвижного состава (аэродинамические характеристики подвижного состава). В связи с тем, что количественное выражение аэродинамических качеств подвижного состава затруднительно, функция отклика имеет следующий вид:

$$y_i = \begin{cases} f(x_1, x_2), & x_3 = 1, \\ f(x_1, x_2), & x_3 = 2, \\ f(x_1, x_2), & x_3 = 3. \end{cases}, i \in 1 \dots n \quad (1)$$

где x_1 – фактор расстояния от датчика до оси пути;

x_2 – фактор высоты датчика над уровнем головки рельса;

x_3 – фактор аэродинамических качеств подвижного состава (1 – низкие; 2 – улучшенные; 3 – высокие).

Для измерения аэродинамического воздействия движущегося поезда на воздушную среду были использованы высокочастотные мембранные датчики избыточного давления. Измерения осуществлялись в диапазоне скоростей от 140 до 250 км/ч в зависимости от типа подвижного состава. Процесс измерений представлен на рисунке 1.

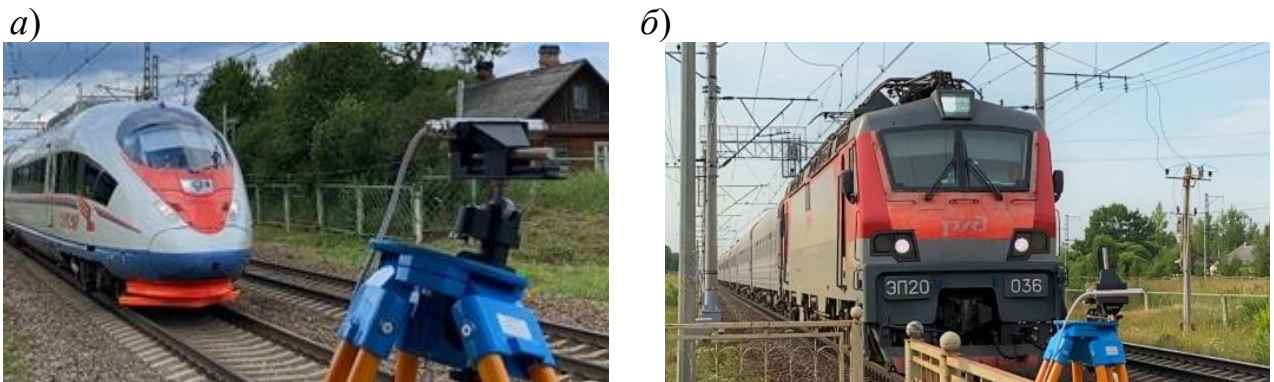


Рисунок 1 – Процесс измерений аэроинамического воздействия от электропоезда «Сапсан» (а) и пассажирского поезда (б)

По результатам обработки и анализа инструментальных измерений были установлены регрессионные зависимости распределения экстремальных величин давлений, образуемых движущимися поездами с различными аэродинамическими качествами. Пример полученных регрессионных функций распределения экстремальных величин давлений для высокоскоростного поезда «Сапсан» представлен для максимальных и минимальных величин давления соответственно в следующих выражениях:

$$y_{3,max} = 0,282 - 0,072 \cdot a_g + 0,015 \cdot h_g + 0,064 \cdot a_g^2 + 0,002 \cdot a_g \cdot h_g - 0,005 \cdot h_g^2; \quad (2)$$

$$y_{3,min} = -0,21 + 0,048 \cdot a_g - 0,014 \cdot h_g - 0,003 \cdot a_g^2 + 0,003 \cdot h_g^2. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации для прогнозных моделей, определяемых выражениями (2) и (3), составляет $R^2 = 0,818$ и $R^2 = 0,841$ соответственно.

Анализ результатов экспериментальных исследований и разработанных регрессионных моделей позволил установить, что интенсивность воздействия от подвижного состава с низкими и улучшенными аэродинамическими качествами на 29 и 51 % соответственно больше, чем воздействие от высокоскоростного поезда с высокими аэродинамическими качествами. Также установлено, что изменение относительной интенсивности a от расстояния от оси пути a_g (м) может быть описано функциональной зависимостью, определяемой выражением

$$a = 0,019 \cdot a_g^2 - 0,318 \cdot a_g + 1,549. \quad (4)$$

В третьей главе осуществляется разработка метода определения эквивалентных нагрузок от аэродинамического воздействия высокоскоростных поездов и расчета пролетных строений пешеходных путепроводов на рассматриваемое воздействие с использованием разработанной и верифицированной численной модели аэродинамического взаимодействия элементов системы «пролетное строение – воздушная среда – движущийся поезд».

Разработка численной модели осуществляется в специализированном комплексе вычислительной гидрогазодинамики, реализующем метод конечных объемов. Разработанная модель верифицирована как результатами выполненных инструментальных измерений и аналогичных отечественных и зарубежных исследований (в т.ч. в специальных аэродинамических установках).

На первом этапе было выполнено исследование аэродинамического воздействия на вертикальную поверхность, расположенную перпендикулярно над путем движения поезда (фасадная поверхность путепровода). Результаты численного моделирования представлены картинками распределения давлений на поверхности (рисунок 2) в зависимости от расстояния от оси пути и высоты над уровнем головки рельса (УГР).

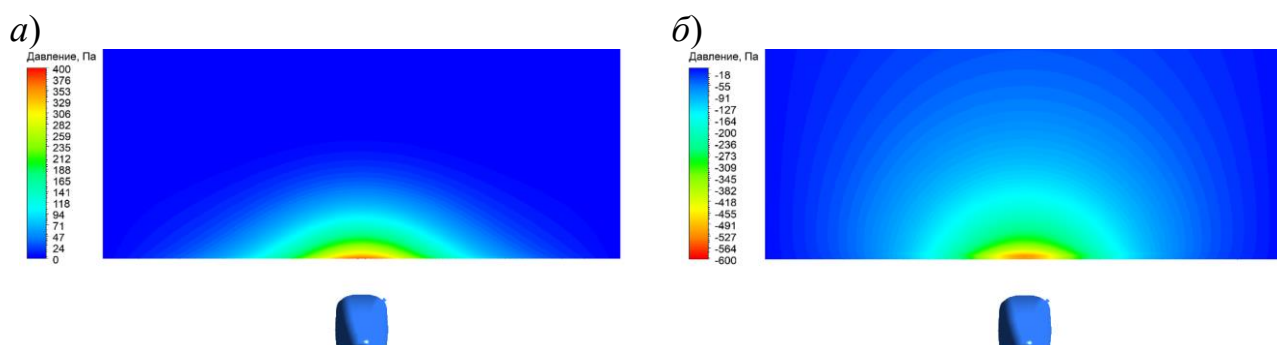


Рисунок 2 – Распределение экстремальных давлений на вертикальную поверхность при скорости 360 км/ч: а) – максимальные давления; б) – минимальные давления

Характер распределения давлений имеет близкий к нормальному распределению характер в зависимости расстояния от оси пути и экспоненциальный характер в зависимости от высоты над уровнем головки рельса. Величина эквивалентной нагрузки q_1 (Па) на вертикальную поверхность может быть представлена в виде базовой величины давления с применяемыми к нему коэффициентами распределения согласно выражению

$$\pm q_1 = q'_{1k} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (5)$$

где q'_{1k} – интенсивность воздействия в зависимости от высоты над уровнем головки рельса в сечении над осью пути, определяемая графически или аналитически, Па;

k_1 – коэффициент, учитывающий аэродинамические качества эксплуатируемого подвижного состава;

k_2 – коэффициент, учитывающий распределение интенсивности в зависимости от расстояния от оси пути a_g , определяемый выражением

$$k_2 = \begin{cases} 1,11 \cdot a_g + 1,1, & a_g \leq -1, \\ 1, & -1 < a_g < 1, \\ -1,11 \cdot a_g + 1,1, & a_g \geq 1. \end{cases} \quad (6)$$

На втором этапе исследования была выполнена оценка аэродинамического воздействия на горизонтальную поверхность, расположенную над путем движения поезда (нижняя поверхность пролетного строения). Пример изополей распределения давлений на поверхности представлен на рисунке 3.

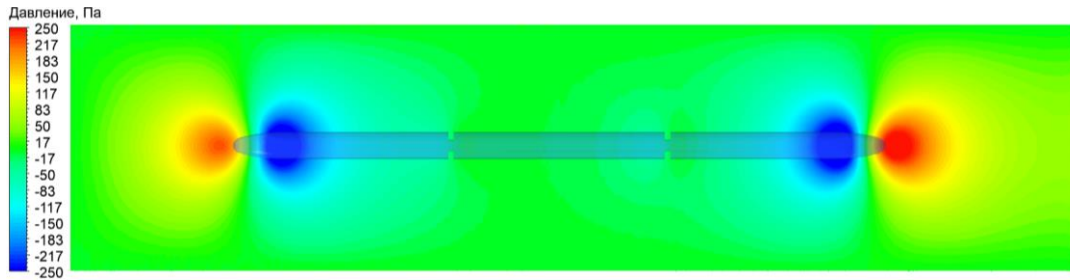


Рисунок 3 – Изополя распределения давлений на горизонтальную поверхность (скорость поезда – 100 м/с, высота поверхности над УГР – 6,4 м)

Распределение давлений в зависимости от высоты над уровнем головки рельса носит схожий характер с вертикальной поверхностью (близкий к нормальному распределению в зависимости от расстояния от оси пути и экспоненциальный в зависимости от высоты поверхности). Величина эквивалентной нагрузки q_2 (Па) также может быть представлена в виде базовой величины давления с введением коэффициентов распределения согласно выражению

$$\pm q_2 = q'_{2k} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (7)$$

где q'_{2k} – интенсивность воздействия в зависимости от высоты над уровнем головки рельса в сечении над осью пути, определяемая графически или аналитически;

k_1 – коэффициент, учитывающий аэродинамические качества эксплуатируемого подвижного состава;

k_2 – коэффициент, учитывающий распределение интенсивности в зависимости от расстояния от оси пути a_g и определяемый выражением

$$k_2 = \begin{cases} 0,118 \cdot a_g + 1,178, & a_g \leq -1,5, \\ 1, & -1,5 < a_g < 1,5, \\ -0,118 \cdot a_g + 1,178, & a_g \geq 1,5. \end{cases} \quad (8)$$

Давления, действующие по контуру поперечного сечения пролетного строения, образуют аэродинамическую силу. Для определения влияния формы поперечного сечения на величину аэродинамических сил была выполнена серия расчетов для наиболее распространенных поперечных сечений (рисунок 4).

Из сопоставления результатов следует, что величина аэродинамических сил, действующих на пролетное строение с поперечным сечением по варианту 3 (рисунок 4,в) существенно (до 89 %) превышает аналогичные силы для других вариантов, что обусловлено его меньшей шириной.

Из анализа результатов расчетов следует, что экстремальным величинам продольной аэродинамической силы, действующей на сооружение, соответствует

такое распределение воздушных масс, при котором на одну фасадную поверхность пролетного строения действует область пониженных давлений воздушной волны (область разрежения), а на другую – область избыточных давлений (рисунок 5). Также необходимо отметить, что при данном распределении воздушных масс аэродинамическая сила противоположно направлена движущемуся поезду.

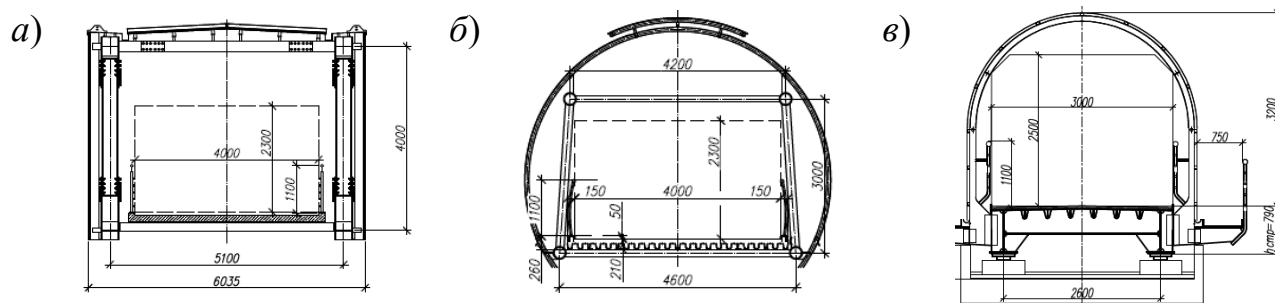


Рисунок 4 – Рассматриваемые поперечные сечения пролетных строений пешеходных путепроводов: а) – вариант 1; б) – вариант 2; в) – вариант 3

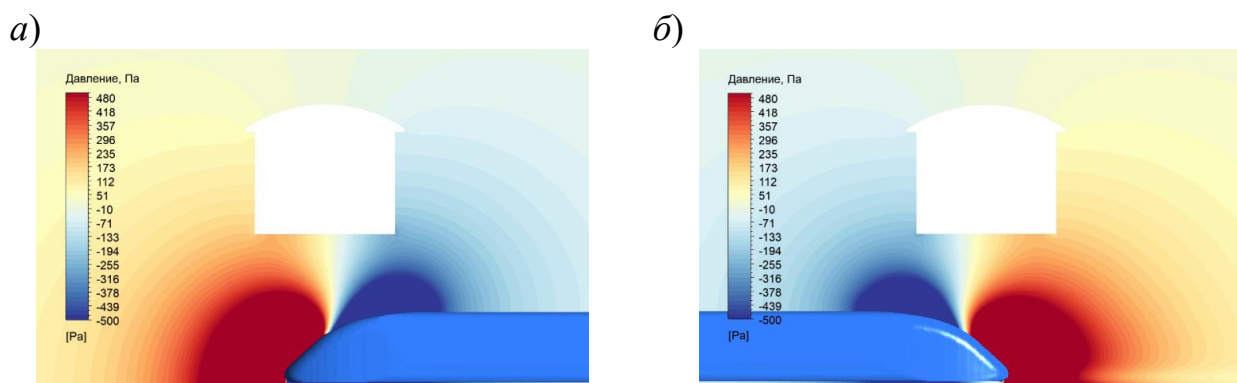


Рисунок 5 – Распределения воздушных масс вокруг сечения, соответствующие экстремальным величинам продольной аэродинамической силы: а) – максимальное воздействие; б) – минимальное воздействие

Для определения влияния ширины конструкции на величины аэродинамических сил была выполнена серия расчетов с изменением ширины пролетного строения в диапазоне от 3 до 20 м при его постоянной высоте 6 м. Из анализа результатов расчетов следует, что изменение ширины сооружения b (м) приводит к снижению интенсивности давлений, действующих на ее поверхности и, как следствие, снижению величины продольной (горизонтальной) аэродинамической силы (рисунок 6,а), описываемой выражением

$$F'_x(b) = 0,0003 \cdot b^3 - 0,0102 \cdot b^2 + 0,0844 \cdot b - 0,7796. \quad (9)$$

где F'_x – относительная интенсивность продольной аэродинамической силы.

Характер изменения интенсивности вертикальной аэродинамической силы в зависимости от ширины b (м) носит монотонный растущий характер с образованием «площадки» при ширине от 14 до 16 м (рисунок 6,б), описываемый выражением

$$F'_y(b) = -0,0017 \cdot b^2 + 0,0867 \cdot b - 0,0674. \quad (10)$$

где F'_y – относительная интенсивность вертикальной аэродинамической силы.

Также выполнена оценка влияния высоты пролетного строения (его нижней поверхности) над уровнем головки рельса на величину интенсивности

аэродинамических сил, действующих на него при проследовании под сооружением высокоскоростного поезда. Из результатов выполненной оценки следует, что при высоте низа конструкции 7,9 м (габарит С400) интенсивность воздействия на 40 % ниже, чем при высоте 6,4 м (габарит приближения строений), при высоте 9,4 м интенсивность снижается на 80 %. При высоте 12,4 м величина аэродинамических сил становится незначительной.

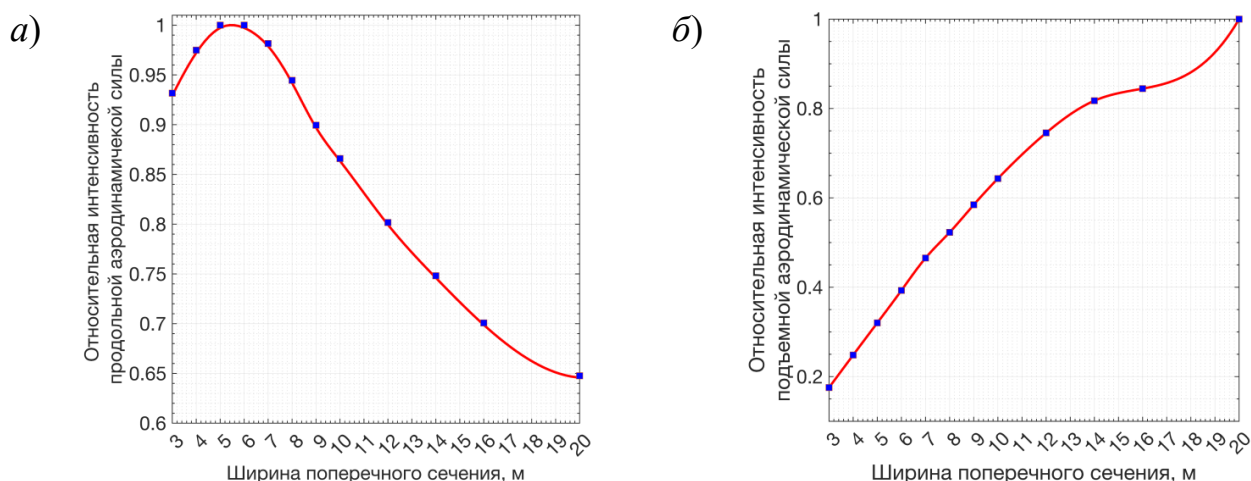


Рисунок 6 – График относительного изменения аэродинамических сил в зависимости от ширины пролетного строения: *а*) – продольная (горизонтальная) сила; *б*) – вертикальная (подъемная) сила

Помимо аэродинамического воздействия на пролетные строения пешеходных путепроводов, особого внимания заслуживает их динамический отклик на аэродинамическое воздействие. Динамический отклик обуславливается:

– знакопеременным импульсом воздушных волн, имеющих частоту, описываемую выражением

$$u = \frac{v}{2l}, \quad (11)$$

где u – частота головной воздушной волны, Гц;

v – скорость поезда, м/с;

l – расстояние между экстремальными значениями воздушной волны, м;

– периодичностью воздушных волн с частотой, определяемой по формуле

$$u = \frac{v}{L}, \quad (12)$$

где u – частота воздушных волн, создаваемых движущимся поездам, Гц;

L – длина поезда, м.

Совпадение частот воздействия с одной из собственных частот пролетного строения способно вызвать существенные ускорения (как вертикальные, так и горизонтальные) и перемещения конструкции, что негативно влияет как на прочностной и усталостный ресурс сооружения, так и на комфортность нахождения на сооружении.

На основании приведенных выше результатов разработан алгоритм расчета пролетных строений пешеходных путепроводов на аэродинамическое воздействие от высокоскоростных поездов, блок-схема которого представлена на рисунке 7.

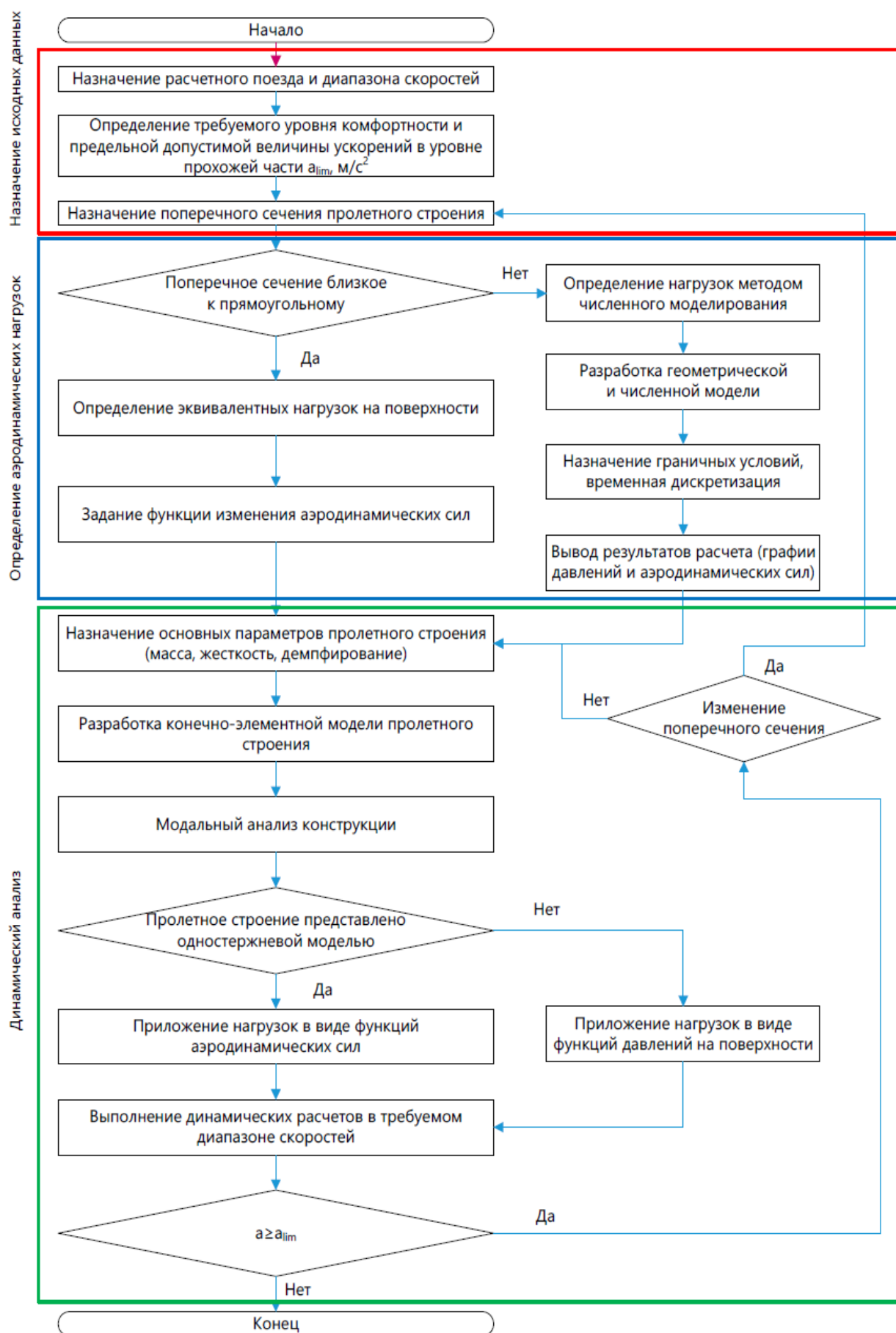


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма расчета пролетных строений на аэродинамическое воздействие от высокоскоростных поездов

На первом этапе алгоритма выполняется сбор исходных данных (в том числе в части назначения конструкции пролетного строения и расчетного поезда, диапазона скоростей), а также задание требуемого уровня комфортности и предельной допустимой величины ускорений в уровне прохожей части.

На втором этапе алгоритма выполняется определение аэродинамических нагрузок, действующих на конструкцию пролетного строения. Способ определения нагрузок зависит от формы поперечного сечения конструкции: если поперечное сечение может быть описано как близкое к прямоугольному (плохообтекаемое), нагрузки определяются как эквивалентные и рассчитываются аналитически; если поперечное сечение не может быть охарактеризовано как близкое к прямоугольному, нагрузки необходимо определять с применением методов численного моделирования с учетом разработанных рекомендаций.

На третьем этапе алгоритма выполняется динамический расчет конструкции с приложением полученных на предыдущем этапе аэродинамических нагрузок. В случае превышения по результатам расчета максимальных допустимых величин ускорений и перемещений, производится изменение конструкции пролетного строения или реализация мероприятий по снижению величины динамического отклика.

В четвертой главе рассмотрена практическая реализация разработанного метода на примере проектируемого пролетного строения пешеходного путепровода в составе вокзального комплекса промежуточной станции высокоскоростной железнодорожной магистрали ВСЖМ-1 Санкт-Петербург – Москва.

Пролетное строение представлено пространственной металлической фермой. Для исследования динамического отклика конструкции на первом этапе было выполнено определение аэродинамических коэффициентов сил, действующих на конструкцию пролетного строения, для высокоскоростных поездов в трех конфигурациях: одиночный состав из 8 и 12 вагонов и сдвоенный из 16 (8+8) вагонов.

На втором этапе исследования полученные нагрузки прикладывались к пространственной стержневой модели конструкции. По результатам динамических расчетов были построены графики вертикальных и горизонтальных перемещений, а также динамических коэффициентов (рисунок 8).

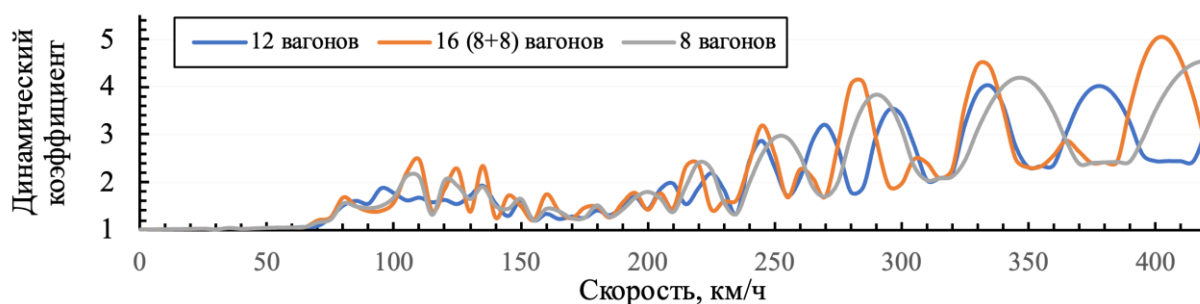


Рисунок 8 – График изменения динамических коэффициентов продольной аэродинамической силы в зависимости от скорости поезда (максимальная сила)

Из анализа построенных графиков следует, что в характере изменения динамических коэффициентов от скорости поезда имеются две составляющие:

равномерная, вызванная импульсным знакопеременным воздействием головной воздушной волны, и некоторая дополнительная составляющая, вызванная совпадением частоты прохождения воздушных волн с собственной частотой пролетного строения. На рисунках 9,а и 9,б приведены графики изменения динамических коэффициентов, полученные по результатам динамического расчета пролетного строения на воздействие только головной воздушной волны.

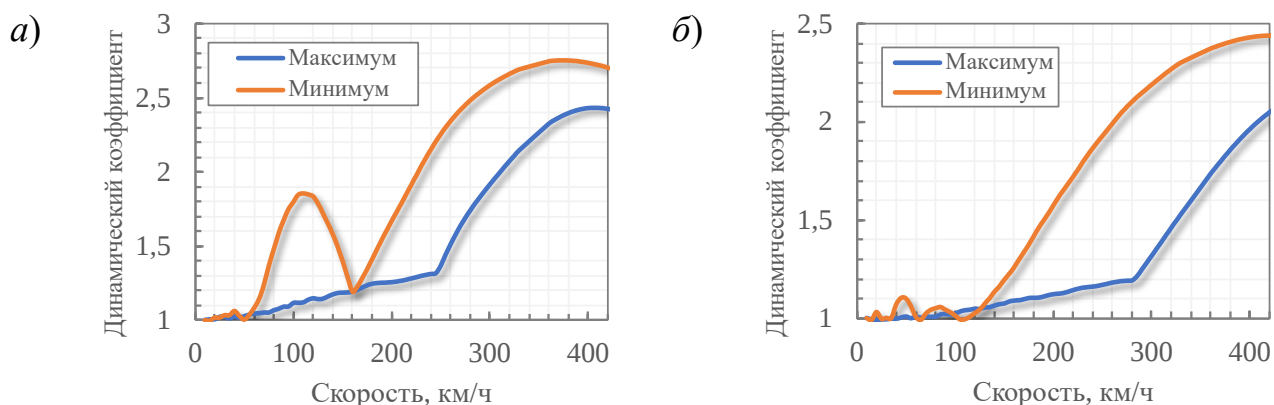


Рисунок 9 – Динамические коэффициенты к аэродинамическим силам при воздействии только импульса головной воздушной волны: а) – горизонтальная сила; б) – вертикальная сила

Таким образом, было подтверждено, что выраженные всплески величины динамических коэффициентов имеют характер, схожий с резонансным: при совпадении одной из собственных частот пролетного строения с частотой импульсов аэродинамического воздействия, а также при синхронизации их фаз происходит резкое увеличение амплитуды перемещений и ускорений в конструкции (рисунок 10,а). В то же время, несовпадение фаз колебаний конструкции и аэродинамического воздействия (рисунок 10,б) соответствует минимальным величинам динамических коэффициентов, так как импульс хвостовой или промежуточной воздушной волны будет гасить энергию колебаний пролетного строения.

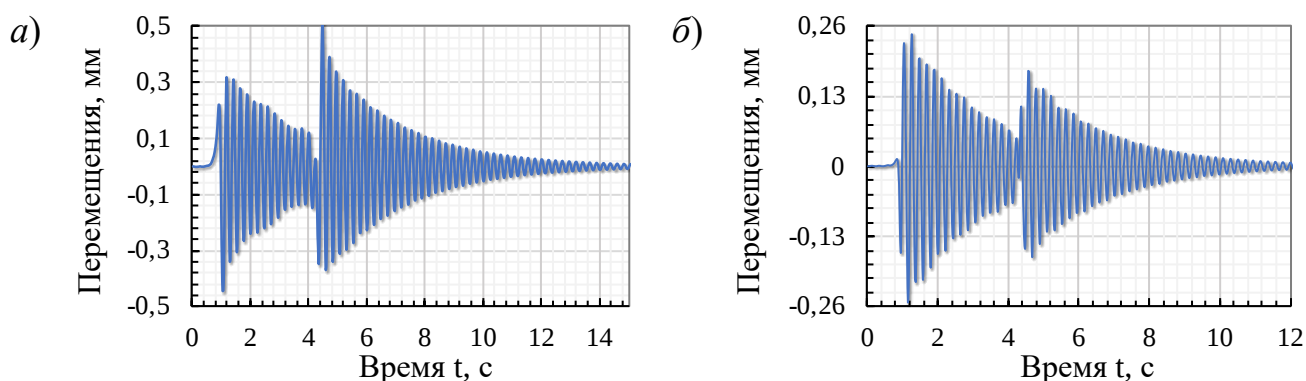


Рисунок 10 – Перемещения в середине пролетного строения при прохождении под ним высокоскоростного поезда: а) – горизонтальные при 12-вагонном поезде и скорости 385 км/ч; б) – вертикальные при 12-вагонном поезде и скорости 345 км/ч

Для снижения величины динамического отклика конструкции на аэродинамическое воздействие от высокоскоростного поезда следует применять конструктивные решения с повышенной поперечной и вертикальной жесткостью.

Одним из способов снижения величины динамического отклика является установка массовых или гидродинамических динамических гасителей колебаний, широко используемых для гашения в том числе аэроупругих колебаний мостов.

Также снижение динамического отклика пролетного строения может быть достигнуто путем снижения аэродинамической нагрузки при перенаправлении воздушных потоков специальными обтекателями и аэродинамическими экранами (рисунок 12).

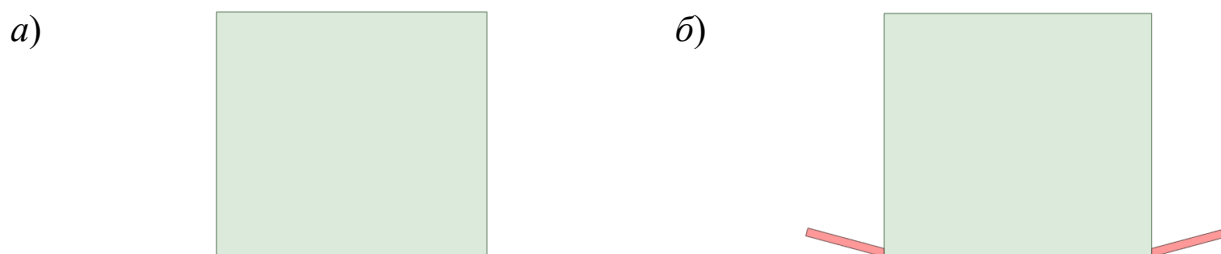


Рисунок 12 – Поперечное сечение пролетного строения: а) – без экрана; б) – с экраном

В силу того, что поперечная жесткость пролетных строений существенно меньше вертикальной, а также ввиду большей чувствительности человека к горизонтальным ускорениям основная цель аэродинамических обтекателей и экранов – снижение горизонтальной аэродинамической силы, действующей на сооружение. Поскольку при увеличении длины экрана величина горизонтальной аэродинамической силы снижается, а вертикальной – увеличивается, были определены оптимальные с точки зрения баланса изменения величины сил параметры длины экрана (2 м) и его угла наклона к горизонтали (15°).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполненных исследований была достигнута цель исследования, решены задачи исследования и сформулированы следующие основные выводы:

1. Результаты выполненного практико-теоретического анализа актуальных тенденций развития высокоскоростных железнодорожных магистралей и конструктивных решений пролетных строений пешеходных путепроводов над железнодорожными путями свидетельствуют о повышенной чувствительности данных сооружений к аэродинамическому воздействию со стороны движущихся высокоскоростных поездов. Результаты оценки существующих отечественных и зарубежных методов расчета свидетельствуют об их недостаточности для осуществления рационального проектирования данных сооружений, поскольку они не содержат характерный расчетный случай воздействия на фасадную поверхность сооружения и не в полной мере учитывают динамический характер аэродинамического воздействия.

2. По результатам выполненных экспериментальных исследований нагрузок от аэродинамического воздействия от движущихся поездов разработаны регрессионные модели распределения экстремальных величин аэродинамических коэффициентов давлений вокруг движущегося подвижного состава с различными аэродинамическими качествами. По результатам исследования установлено, что

интенсивность воздействия от подвижного состава с низкими и улучшенными аэродинамическими качествами на 29 и 51 % соответственно больше, чем воздействие от высокоскоростного поезда с высокими аэродинамическими качествами. Также установлено, что на расстоянии 5 м от оси пути интенсивность снижается на 50 %, на расстоянии 8 м – на 80 %.

3. С применением разработанной верифицированной численной модели взаимодействия элементов системы «пролетное строение – воздушная среда – движущийся поезд» разработаны аналитические модели распределения давлений и аэродинамических сил, действующих на пролетные строения пешеходных путепроводов при проследовании под ними высокоскоростных поездов.

4. На основании разработанных аналитических моделей разработаны усовершенствованные метод определения эквивалентных нагрузок на пролетные строения пешеходных путепроводов от аэродинамического воздействия от высокоскоростных поездов и метод расчета пролетных строений на рассматриваемое воздействие, который, в отличие от существующих методов, учитывает как вертикальную, так и горизонтальную аэродинамическую силу, действующую на сооружение. Также разработаны рекомендации по численному моделированию аэродинамического воздействия элементов системы «пролетное строение – воздушная среда – движущийся поезд».

5. По результатам исследования влияния высоты от уровня головки рельса до нижней поверхности пролетного строения на величину аэродинамических сил, действующих на сооружение, установлено, что при высоте 7,9 м от уровня головки рельса до нижней поверхности конструкции интенсивность воздействия снижается на 40 % относительно интенсивности при высоте 6,4 м, при высоте 9,4 м – на 80 %. Результаты исследования влияния ширины пролетного строения на величину аэродинамических сил определяют пролетные строения с шириной от 4 до 7 м как наиболее подверженные аэродинамическому воздействию, что обусловлено совпадением ширины поперечного сечения с расстоянием между экстремумами знакопеременной воздушной волны, создаваемой движущимся поездом.

6. Установлено, что динамический отклик пролетного строения на аэродинамическое воздействие со стороны движущегося поезда имеет двухкомпонентный характер, состоящий из первичного возбуждения, вызванного воздействием знакопеременного импульса головной воздушной волны, и вторичного возбуждения, вызванного периодическим характером головной, хвостовой и промежуточной (для сдвоенных поездов) волн.

7. По результатам практической реализации разработанного метода расчета пролетного строения пешеходного путепровода на аэродинамическое воздействие от высокоскоростного поезда на примере проектируемого сооружения в составе вокзального комплекса промежуточной станции высокоскоростной железнодорожной магистрали ВСЖМ-1 Санкт-Петербург – Москва установлено, что на величину динамического отклика пролетного строения от аэродинамического воздействия высокоскоростного поезда влияют не только параметры конструкции, но и параметры обращающегося подвижного состава (скорость, длина, конфигурация).

8. Разработаны рекомендации по назначению конструктивных решений пролетных строений пешеходных путепроводов над путями высокоскоростных железнодорожных магистралей, заключающиеся в применении конструктивных решений в виде пространственных сквозных ферм с проходной частью в уровне нижнего пояса и отказе от применения пролетных строений из композиционных материалов и алюминиевых сплавов при проектировании пешеходных путепроводов над путями высокоскоростных магистралей.

9. Разработан перечень возможных мероприятий по снижению величины динамического отклика пролетных строений на аэродинамическое воздействие, включающий в себя в том числе установку динамических гасителей колебаний, аэродинамических обтекателей и экранов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Лабутин, Н. А. Экспериментальные измерения аэродинамики подвижного состава. / Н. А. Лабутин, Л. К. Дьяченко, А. В. Ланг // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (62). – С. 40–48.

2. Лабутин, Н. А. Разработка численной модели аэродинамического воздействия высокоскоростного поезда на объекты инфраструктуры / Н.А. Лабутин // Мир транспорта. – 2022. – т. 20. – №4 (101). – С. 6–16.

3. Лабутин, Н. А. Исследование аэродинамического воздействия высокоскоростного поезда на пешеходные путепроводы / Н.А. Лабутин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2023. - №3 (66). – С. 28–40.

4. Лабутин, Н. А. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на решетчатые пролетные строения / Н. А. Лабутин, Е. Е. Луковников // Путь навигатор. – 2023. – № 57 (83). – С. 52–63.

5. Лабутин, Н. А. Актуализация методики учета аэродинамического воздействия от поездов на высокоскоростных железнодорожных магистралях / Н. А. Лабутин, Л. К. Дьяченко, Е. Е. Луковников // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. – Т. 21, вып. 1. – С. 142–155.

В изданиях с индексацией в Scopus:

1. Benin, A. Assessment of the aerodynamic impact on pedestrian overpasses in high-speed traffic / A. Benin A., N. Labutin // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021. Switzerland, 2022.

2. Diachenko, L. Development and verification of a computational model of the aerodynamic impact of high-speed rolling stock in infrastructure facilities / L. Diachenko, N. Labutin, A. Lang // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021. Switzerland, 2022.

В других изданиях:

1. Лабутин, Н. А. Особенности аэродинамических нагрузок от высокоскоростного подвижного состава на объекты инфраструктуры. / Н. А. Лабутин, А. В. Бенин // III Бетанкуровский инженерный форум. Сборник трудов

международной научно-технической конференции 2021 г. – ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021 – С. 9–11.

2. Лабутин, Н. А. Разработка расчетной модели аэродинамического воздействия высокоскоростного поезда на элементы инфраструктуры. / Н. А. Лабутин, Л. К. Дьяченко, А. В. Бенин // III Бетанкуровский инженерный форум. Сборник трудов международной научно-технической конференции. 2021 г. – ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021 – С. 12–14.

3. Labutin, N. Experimental verification of a simulation model of high-speed train aerodynamic impact on railway infrastructure / N. Labutin, A. Benin, L. Diachenko // IOP Conference Series Materials Science and Engineering T. 1252 – 2022.

4. Лабутин, Н. А. Комплексные измерения динамического и аэродинамического воздействий высокоскоростного подвижного состава на мостовые сооружения. / Н. А. Лабутин, А. В. Ланг, Е. Е. Луковников, Л. К. Дьяченко // Транспорт. Проблемы, идеи, перспективы. Сборник трудов LXXXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2022. – ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022 – С. 34–38.

5. Лабутин, Н. А. Аэродинамическое взаимодействие подвижного состава, воздушной среды и объектов инфраструктуры в условиях высокоскоростного сообщения. / Новые технологии в мостостроении. Сборник трудов международной научно-практической конференции. 2022. – ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022 – С. 90–94.

6. Лабутин, Н. А. Исследование аэродинамического воздействия высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на решетчатое пролетное строение / Н. А. Лабутин // Новые технологии в мостостроении. 140 лет кафедре «Мосты» : Сборник трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 18–19 мая 2023 года. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023. – С. 71–76.

7. Ключевые особенности воздействия высокоскоростных поездов на искусственные сооружения / Е. Е. Луковников, Н. А. Лабутин // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (РИЛТТРИНАС-2023). Сборник трудов пятой международной научно-практической конференции. в 2-х частях. Часть 1. Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023. С. 123–132.