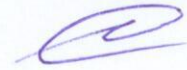


На правах рукописи



Поддаева Ольга Игоревна

ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ В ПРЕДЕЛАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

2.9.10. Техносферная безопасность транспортных систем

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Москва – 2022

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

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор
Локтев Алексей Алексеевич

Официальные оппоненты: **Фомин Василий Михайлович**
доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, федеральное государственное бюджетное учреждения науки "Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук", научный руководитель

Алгазин Сергей Дмитриевич,
доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук", лаборатория механики и оптимизации конструкций, ведущий научный сотрудник

Ланис Алексей Леонидович
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», управление научно-исследовательских работ, начальник

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук»

Защита состоится «11» октября 2023 г., в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 40.2.002.08 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)) по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр.9 (ауд. 329, ул. Часовая, 22/2)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.rut-miit.ru.

Автореферат разослан «06» июля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Апатцев Владимир Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Транспортные системы отличаются высокими рисками, проявляющимися при эксплуатации, строительстве и других этапах жизненного цикла. В целом объекты транспорта связаны с повышенной опасностью из-за значительных скоростей движения транспортных средств, высоких перемещаемых масс, знакопеременной динамической нагрузки, наличия множества обеспечивающих систем и зависимостью от человеческого фактора. Отечественная и зарубежная нормативно-правовая и техническая документация наряду с конкретными количественными значениями, определяющими параметры техносферных воздействий, которые могут представлять определенную опасность для объекта транспортной инфраструктуры, его конструкций, отдельных элементов, а также для работников при выполнении технологических процессов мониторинга, текущего содержания и ремонтных работ, содержит ряд качественных характеристик, которые не формализованы в полной мере. Определение количественных значений факторов состояния и поведения мостовых переходов и параметров опасных зон вблизи различных элементов рассматриваемых конструкций является важной задачей как с точки зрения обеспечения безопасного труда, так и с точки зрения техносферной безопасности сооружения в целом. Для обеспечения требований техносферной безопасности в части воздействия на работников, участвующих в технологических процессах непосредственно на объекте транспортной инфраструктуры, например, на мостовом переходе, негативные воздействия могут быть связаны как с повышенной вибрацией и шумом, так и с ветровыми потоками, в том числе, переносящими абразивные частицы, различные фракции элементов агрессивных сред, пыли. Действующие отечественные и зарубежные нормы для таких случаев предлагают использовать результаты испытаний в аэродинамических трубах. Понимание картины распределения динамических нагрузок на критически важном объекте транспортной инфраструктуры позволит сформировать картину зарождения и развития опасных зон при проведении различных работ.

Изложенное подчеркивают актуальность заявленной темы и необходимость решения ряда задач, направленных на обеспечение техносферной безопасности

критически важных объектов транспортной инфраструктуры на различных этапах жизненного цикла, включая проектирование, строительство и эксплуатацию рассматриваемых объектов.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам выявления факторов транспортной деятельности и их влияния на техносферную безопасность критически важных объектов инфраструктуры посвящены работы: Аксенова В.А., Апатцева В.И., Белостоцкого А.М., Мусаева В.К., Малыгина И.Г., Завьялова А.М., Пушенко С.Л., Титовой Т.С., Трофименко Ю.В., Филлипова В.Н., Шварцбурга Л.Э., Сачковой О.С., Копытенковой О.И., Фомина В.М., Немировского Ю.В., Попова В.Н. и др.

Физические и физико-химические процессы, включая ветровые, гололедные, акустические, вибрационные воздействия, во многом определяющие опасные факторы транспортной деятельности на инфраструктурных объектах рассматривались в работах следующих авторов: Белоцерковского О.М., Казакевича М.И., Кузнецова С.В., Кулеш В.П., Локтева А.А., Зленко Н.А., Алгазина С.Д. и др.

Разработке, апробации и анализу методов и средств обеспечения техносферной безопасности транспортных систем, включая методы проведения теоретико-экспериментального моделирования состояния и поведения критически важных объектов инфраструктуры, подвижного состава при различных техногенных и природных воздействиях посвящены работы: Абрамовича Г. Н., Кулекиной А. В., Сычева В.П., Сергеева К.А., Илларионовой Л.А. и др.

Методы и средства повышение безопасности транспортной инфраструктуры, в том числе, путем использования пассивных элементов защиты от снежных заносов, акустического шума, вибраций, сейсмических воздействий рассматривались в работах Копытенковой О.И., Мусаева В.К., Шашурина А.Е., Светлова В.В., Лебедева О.А., Овсянникова С.Н. и др.

Целью диссертационной работы является разработка комплекса решений по обеспечению техносферной безопасности критически важных объектов транспортной инфраструктуры на всех этапах жизненного цикла.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**, результаты которых затем агрегируются в рамках настоящего исследования:

1. Провести анализ, выявить и сформировать классификацию техносферных воздействий с учетом климатических и техногенных факторов (ветровых, в т.ч. ветровых потоков с абразивными частицами, снеговых, гололедных воздействий, воздействий от агрессивных сред, химически активных воздействий и т.д.) на критически важные объекты транспортной инфраструктуры.

2. Сформулировать на основе предложенной классификации систему оценки техносферных воздействий на критически важные объекта транспортной инфраструктуры и возможных сценариев поведения исследуемых объектов.

3. Разработать комплексную методiku теоретико-экспериментального моделирования климатических и техногенных воздействий на различные объекты транспортной инфраструктуры.

4. Провести теоретико-экспериментальное моделирование, включающее проектирование и создание масштабных моделей для проведения физических экспериментов, а также апробацию на примере как реально существующих, так и проектируемых сооружений на различных этапах их жизненного цикла.

5. Разработать комплекс моделей для анализа динамического поведения критически важных объектов транспортной инфраструктуры, включая мостовые переходы, с учетом техносферных воздействий различного типа (снеговые, ветровые, гололедные, температурные воздействия, воздействия агрессивных сред в различном агрегатном состоянии, переносимых ветровыми потоками), который можно реализовать с помощью экспериментальных и аналитических вычислительных схем.

6. Сформировать на основе анализа результатов теоретико-экспериментального моделирования перечень опасных факторов, влияющих на техносферную безопасность критически важных объектов транспортной инфраструктуры на различных этапах их жизненного цикла.

7. Разработать методы и технические решения для безопасного выполнения работ, с учетом механизма зарождения и развития опасных зон на критически важных объектах инфраструктуры и в непосредственной близости от них, и для уменьшения негативного влияния эксплуатации транспортной инфраструктуры на окружающую среду при различных климатических и техногенных воздействиях на разных этапах жизненного цикла;

8. Разработать метод верификации результатов теоретико-экспериментального моделирования для критически важных объектов транспортной инфраструктуры и апробировать его для реально существующих и только проектируемых сооружений.

Объект исследования: транспортные системы, включающие критически важные объекты транспортной инфраструктуры, в том числе расположенные в городских агломерациях; технические требования, факторы и технологии безопасного возведения и эксплуатации таких объектов при различных природных и техногенных воздействиях и их сочетаниях.

Предмет исследования: техносферная безопасность критически важных объектов транспортной инфраструктуры в течение всего жизненного цикла с достижением нормативных значений параметров функционирования транспортной системы.

Тематика работы соответствует паспорту специальности 2.9.10 – «Техносферная безопасность транспортных систем» – п. 2. «Негативные факторы транспортной деятельности и их влияние на уровень техносферной безопасности»; п.4. «Физические, физико-химические, биологические и социально-экономические процессы, производственные и информационно-коммуникационные технологии и материалы, определяющие опасные факторы транспортной деятельности»; п. 5. «Техносферная безопасность в жизненном цикле транспортных средств, объектов транспортной инфраструктуры, технологий транспортировки грузов и пассажиров, транспортных информационно-коммуникационных технологий»; п. 8. «Методы и средства обеспечения техносферной безопасности транспортных систем», п. 11. «Методы

и средства повышение экологичности и безопасности транспортных средств, транспортной инфраструктуры».

Научная новизна работы:

1. Впервые предложена система оценки факторов техносферных воздействий на критически важные объекты транспортной инфраструктуры, основанная на классификации подходов к исследованию техногенных и климатических воздействий на различные типы сооружений, на теоретико-экспериментальном моделировании с учетом уникальности и ответственности сооружений, орографии окружающей местности, оригинальной архитектурной формы, и высокой вероятности сочетания нескольких метеорологических факторов.

2. Разработан и апробирован алгоритм моделирования климатических воздействий на объекты транспортной инфраструктуры, основанный на экспериментальных исследованиях различных типов объектов транспортной инфраструктуры на различных этапах их жизненного цикла.

3. Впервые предложен комплекс моделей динамического поведения критически важных объектов транспортной инфраструктуры с учетом климатических, техногенных и сопутствующих воздействий, базирующихся на моделировании как самого сооружения, его конструкции и отдельных элементов, так и технологических процессов, происходящих при монтаже и эксплуатации на различных этапах их жизненного цикла.

4. Впервые на основе результатов теоретико-экспериментального моделирования сформирован перечень опасных факторов с учетом природных и техногенных воздействий, влияющих на техносферную безопасность объектов транспортной инфраструктуры в пределах жизненного цикла, используемый при выполнении работ оборудования, обучения сотрудников, проведение специальной оценки условий труда, оценки профессиональных рисков.

5. Предложены методы и технические решения для безопасного выполнения работ на критически важных объектах инфраструктуры при техносферных воздействиях, позволяющие находить опасные зоны при реализации технологических процессов непосредственно на сооружении или

поблизости от него, при этом учитывающих сочетания климатических и техногенных воздействий, орографию местности; а также система мер для снижения влияния эксплуатации критически важных объектов транспортной инфраструктуры на окружающую среду и сами сооружения.

6. Предложен и апробирован инженерный метод верификации результатов теоретико-экспериментального моделирования для различных критически важных объектов транспортной инфраструктуры. Использование метода верификации совместно с современными информационно-вычислительными комплексами и физическими испытаниями макетов сооружений решает многие задачи техносферных воздействий методами экспериментального моделирования. Использование предлагаемых подходов на этапе проектирования на 40% увеличивает долговечность объектов транспортной инфраструктуры.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что полученные научные результаты, выводы и предложения позволяют сформировать перечень опасных факторов, влияющих на техносферную безопасность объектов транспортной инфраструктуры в пределах жизненного цикла с учетом природных и техногенных воздействий; усовершенствовать систему оценки факторов техносферных воздействий, что позволяет проводить оценку профессиональных рисков, определять места зарождения и параметры развития опасных зон на критически важном объекте транспортной инфраструктуры и в непосредственной близости от него.

Разработанные и апробированные алгоритмы моделирования объектов транспортной инфраструктуры и математические модели динамического поведения объектов транспортной инфраструктуры с учетом климатических и техногенных воздействий представляют интерес как с точки зрения развития фундаментальных основ в области техносферной безопасности транспортных систем, так и с точки зрения инженерных задач проектирования технологических процессов мониторинга, диагностики сооружений, выполнения ремонтных работ с учетом технологии безопасного выполнения работ, а также продления жизненного цикла сооружения.

Расчетно-обоснованные результаты моделирования климатических и техногенных воздействий на различные объекты транспортной инфраструктуры (мосты, аэровокзальные комплексы, канатные дороги, решетчатые конструкции и др.) успешно применены при их проектировании.

Предложенный инженерный метод верификации результатов теоретико-экспериментального моделирования с использованием аэродинамических труб востребован в специализированных лабораториях при выполнении научно-исследовательских работ и позволяет существенно упростить и удешевить работы, связанные с физическим моделированием объектов транспортной инфраструктуры и транспортных систем в целом.

Результаты диссертации нашли практическое применение в учебном процессе по образовательным программам высшего образования и дополнительного профессионального образования в Российском университете транспорта.

Методология и методы исследования основаны на системном анализе технологических процессов, происходящих на объектах транспортной инфраструктуры на различных этапах их жизненного цикла, положениях и алгоритмах теории вероятностей и математической статистики, методах оценки и анализа рисков, методах строительной аэродинамики. При получении, обработке и оформлении результатов были использованы компьютерные программы Microsoft Office, MathCAD, а также разработанные программы для ЭВМ, реализованные с помощью языков программирования Pascal, C++.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ оценки факторов техносферных воздействий на критически важные объекта транспортной инфраструктуры, учитывающий комплекс техногенных и климатических воздействий, уникальность, ответственность сооружений, орографию окружающей местности, вероятность сочетания нескольких факторов.

2. Алгоритм моделирования климатических воздействий на объекты транспортной инфраструктуры, основанный на экспериментальных

исследованиях сооружений в аэродинамической трубе на стадии строительства и эксплуатации.

3. Комплекс физических и математических моделей динамического поведения критически важных объектов транспортной инфраструктуры с учетом климатических и техногенных воздействий, впервые учитывающих особенности самого сооружения, технологических процессов, происходящих на различных этапах жизненного цикла.

4. Методические рекомендации по формированию перечня опасных факторов, влияющих на техносферную безопасность объектов транспортной инфраструктуры в пределах жизненного цикла.

5. Расчетно-обоснованные методы и технические решения для безопасного выполнения работ на критически важных объектах инфраструктуры при техносферных воздействиях и снижения влияния эксплуатации таких объектов на окружающую среду, человека и конструкции сооружений; при этом впервые учитывалось смоделировать зарождение и развитие опасных зон непосредственно на сооружении или поблизости от него.

6. Метод верификации результатов теоретико-экспериментального моделирования для различных критически важных объектов транспортной инфраструктуры, учитывающий параметры динамического взаимодействия реального сооружения и природно-климатических факторов.

Апробация работы. Результаты исследований, изложенные в диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях и семинарах: The International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2014 (Томск, 2014), XXV Polish-Slovak-Russian Seminar Theoretical Foundation of Civil Engineering (Словакия, 2016), 4th International Conference on Advanced Materials and Information Technology Processing (AMITP 2016) (Китай, 2016), 5th International Scientific Conference «Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education» (Москва, 2016), международная конференция «Новая наука: проблемы и перспективы» (Москва, 2016), XIX Международная межвузовская научно-практическая конференция студентов, магистрантов,

аспирантов и молодых учёных (Москва, 2016), 7th European and African Conference on Wind Engineering, EACWE (Бельгия, 2017), RSP 2017 – XXVI R-S-P Seminar 2017 Theoretical Foundation of Civil Engineering (Польша, 2017), международная конференция «High-Rise Construction 2017 (HRC 2017)» (Самара, 2017), 4th International Conference on Advanced Engineering and Technology (4th ICAET) (Китай, 2017), XXI International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering «Construction - The Formation of Living Environment» (FORM 2018) (Москва, 2018), International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies (Владивосток, 2018), VI International Scientific Conference «Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education» (IPICSE-2018) (Москва, 2018), международная конференция «Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TPACEE 2018)» (Москва, 2018), XXII International Scientific Conference «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2019) (Узбекистан, 2019), International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018 (Самара, 2018), международная конференция «Modelling and Methods of Structural Analysis» (Москва, 2019), Всероссийская научно-практическая конференция. «Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы – 2019» (Москва, 2019), «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования. Первая Национальная конференция» (Москва, 2020), «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. XX Международная конференция» (Нижний Новгород, 2020), «International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia - 2021» (Красноярск, 2021), I Международная научная конференция аспирантов и молодых учёных «Железная дорога: путь в будущее» (Москва, 2022), Всероссийских конференциях с международным участием «Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство» (Москва, 2020-2022), на научных семинарах кафедр «Техносферная безопасность» и «Транспортное строительство» РОАТ РУТ (МИИТ) в 2019 – 2022 годах.

Внедрение результатов исследования. Разработанная методика оценки факторов техносферных воздействий на критически важные объекта транспортной

инфраструктуры; сформулированный перечень опасных факторов, влияющих на техносферную безопасность объектов в пределах жизненного цикла; разработанный алгоритм моделирования объектов транспортной инфраструктуры при динамическом воздействии различных климатических и техногенных нагрузок; предложенный комплекс физических и аналитических моделей, учитывающих климатические и техногенные динамические воздействия; методы и средства снижения влияния эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры на окружающую среду и сами сооружения инфраструктуры; инженерный метод верификации результатов теоретико-экспериментального моделирования для различных критически важных объектов используются в производственной, проектной, научно-исследовательской и учебной деятельности Группы компаний «Вагонпутьмаш» (г. Москва), Независимого испытательного центра наземных транспортных комплексов (г. Москва), Российского университета транспорта (МИИТ).

Личный вклад автора диссертации заключается в постановке цели и задач научной работы, разработке плана проведения исследований, в анализе и оценке факторов техносферных воздействий на критически важные объекта транспортной инфраструктуры, в анализе подходов и методов оценки ветровых и сопутствующих воздействий на критически важные объекта транспортной инфраструктуры. Алгоритм моделирования климатических и техногенных воздействий на объекты транспортной инфраструктуры в аэродинамической трубе на стадии строительства и эксплуатации, а также математическая модель динамического поведения критически важных объектов транспортной инфраструктуры с учетом аэродинамических и сопутствующих воздействий разработаны и апробированы лично автором. Автором сформирован перечень опасных факторов, влияющих на техносферную безопасность объектов в пределах жизненного цикла, разработан комплекс физических и аналитических моделей, учитывающих комплексное аэродинамическое воздействие на объекты транспортной инфраструктуры. Также автор расчетно обосновал перспективность применения методов и средств снижения влияния эксплуатации критически важных объектов транспортной инфраструктуры на

окружающую среду и сами сооружения посредством использования аэродинамических обтекателей, шумозащитных экранов и т.д. Метод верификации результатов аналитического и экспериментального моделирования для различных критически важных объектов транспортной инфраструктуры предложен и широко апробирован лично автором. Автором были систематизированы и обобщены полученные результаты теоретико-экспериментального моделирования, сформулированные в основных положениях и результатах диссертации.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования изложены в 44 работах, в том числе в 18 статье в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, которые соответствуют перечню рецензируемых изданий, где должны быть опубликованы научные результаты диссертации на соискание ученой степени по специальности 2.9.10 «Техносферная безопасность транспортных систем» и в 26 статьях из изданий, входящих в международные базы научного цитирования Web of Science и Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем исследовательской работы составляет 270 машинописных страниц, основной текст изложен на 236 страницах, содержит 168 рисунков и 11 таблиц. Список литературы включает 227 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена и обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, решение которых необходимо для достижения заявленной цели, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, достоверность и обоснованность результатов, личный вклад автора, внедрение и апробация результатов работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Обоснованы основные направления совершенствования системы обеспечения техносферной безопасности транспортных систем на моделирования и оценки факторов техносферных воздействий на критически важные объекта транспортной инфраструктуры.

Первая глава посвящена анализу техносферных воздействий с учетом климатических и техногенных факторов (ветровых, в т.ч. ветровых потоков с абразивными частицами, снеговых, гололедных воздействий, воздействий от агрессивных сред, химически активных воздействий и т.д.) на критически важные объекты транспортной инфраструктуры.

Согласно Распоряжению Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р климатическая уязвимость транспортной инфраструктуры РФ отнесена к проблемам и ключевым инфраструктурным вызовам транспортного комплекса.

Приведен анализ аварий на различных объектах транспортной инфраструктуры. Установлено и подтверждено инженерными примерами поведения реальных конструкций, что техносферные воздействия, основанные на ветровых и сопутствующих воздействиях (воздействие агрессивных сред, влаги, снега, гололедной нагрузки, химически активных воздействий, ветровые потоки с абразивными частицами и т.д.) являются одной из причин аварий и катастроф различных сооружений. В данном разделе представлена основная информация о перечисленных явлениях в контексте возможностей моделирования с помощью подходов, представленных в следующих разделах.

Одной из основных причин разрушения мостовых конструкций является аэродинамическая неустойчивость, вызванная ветровой нагрузкой с сопутствующими явлениями (перенос пыли, абразивных частиц, интенсивное образование надели и т.д.), в том числе недоучет климатических и техногенных нагрузок при проектировании. Главной причиной обрушения кровель объектов транспортной инфраструктуры является снег и недоучет снеговых нагрузок на этапе проектирования. В разделе сделан обоснованный вывод, что основной проблемой действия наледи и снега на мостовые конструкции становится аэродинамическая устойчивость мостовых переходов, а не увеличение нагрузки от ветра.

Произведен анализ отечественных и зарубежных современных исследований на тему взаимодействия различных объектов транспортной

инфраструктуры (здания аэропортов, вокзалов, различные решетчатые конструкции и т.д.) с окружающей средой при динамических воздействиях.

Особое внимание уделено взаимодействию мостовых конструкций с ветровым потоком, поскольку мостовые сооружения обладают повышенной чувствительностью к динамическим нагрузкам, то для мостовых переходов при определенных условиях техноферные воздействия могут вызвать явления аэродинамической неустойчивости. Приведена классификация явлений аэроупругой неустойчивости, перечислены основные явления аэроупругой неустойчивости и методики проверки мостовых сооружений на них, приведенные как в нормативно-технической, так и научной литературе.

В работе произведен достаточно подробный анализ снеговых воздействий на объекты транспортной инфраструктуры. Большинство современных норм и стандартов содержит данные по распределению снеговой нагрузки для набора типовых форм кровли. В последние годы зарубежными и отечественными авторами было проведено значительное количество исследований, посвященных исследованию снегопереноса на кровле зданий и сооружений, полученные результаты могут быть интерпретированы и для переноса твердых фракций (песка, пыли) или частиц внешней агрессивной среды (изморозь, водяные брызги, морской туман и т.д.).

Из приведенного обзора следует, что для определенных типов объектов транспортной инфраструктуры (полный перечень таких конструкций содержится в диссертационной работе) проведение физического моделирования ветровых и сопутствующих воздействий, связанных с переносом различных фракций элементов окружающей среды, в аэродинамических трубах является обязательной частью исследования на этапе их проектирования.

Поскольку физические испытания в аэродинамических трубах являются основным видом исследования объектов транспортной инфраструктуры на техноферные воздействия, в первой главе приводятся требования к проведению физических испытаний сооружений в аэродинамических трубах, предъявляемые отечественными и зарубежными нормативными документами.

На основе проведенного анализа предложена система классификации техносферных воздействий, основанных на ветровых и сопутствующих воздействиях (воздействие агрессивных сред, влаги, снега, гололедной нагрузки, химически активных воздействий, ветровые потоки с абразивными частицами и т.д.) на критически важные объекты транспортной инфраструктуры (Рисунок 1), на основе которой сформулирован подход к оценке таких воздействий и возможных сценариев поведения исследуемого объекта на различных этапах его жизненного цикла.



Рисунок 1 – Факторы, влияющие на техносферную безопасность транспортных систем

Рассматриваемые критически важные объекты транспортной инфраструктуры предлагается разделять на типы в зависимости от высоты, длины пролета, типа расчетной схемы, ограждающих конструкций, характеру динамических воздействий и производственно-эксплуатационных процессов на объекте и в непосредственной близости от него.

Вторая глава посвящена описанию разработанной комплексной методики теоретико-экспериментального моделирования климатических и техногенных воздействий на объекты транспортной инфраструктуры.

Данная методика включает в себя: статистическую методику анализа климатических воздействий и методику экспериментального моделирования климатических воздействий на различные типы объектов транспортной инфраструктуры, в том числе:

- методику моделирования ветровых воздействий, содержащую подробное описание динамических и статических испытаний мостовых сооружений, весовых и дренажных испытаний зданий и сооружений, а также методику оценки резонансного вихревого возбуждения;
- методику моделирования снеговых воздействий на покрытия объектов транспортной инфраструктуры;
- методику оценки надели на объектах транспортной инфраструктуры и сопутствующих рисков;
- методику исследования различных типов шумозащитных экранов;
- методику экспериментального исследования распространения пылевых загрязнений на территории объектов транспортной инфраструктуры.

Комплексная методика ветровых и снеговых воздействий основана на статистическом анализе двумерных частотных распределений. Идея методики состоит в получении дополнительных статистических данных о климатических воздействиях, необходимых для предварительного климатического анализа района строительства объекта транспортной инфраструктуры. Проведение подобного математического анализа на этапе проектирования объекта позволит дополнить и оптимизировать процесс моделирования климатических нагрузок на объекты транспортной инфраструктуры.

Схема первой части методики (статистический анализ экстремальных ветровых воздействий) представлена на Рисунок 2. Для проектирования таких объектов транспортной инфраструктуры, как мостовые конструкции в первую очередь требуется точный и достоверный анализ экстремальных направлений ветра.

Сама методика основана на использовании стандартного статистического критерия хи-квадрат

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}, \quad (1)$$

где i – номер строки (1 до r); j – номер столбца (от 1 до c); O_{ij} – наблюдаемые частоты (observed), E_{ij} – ожидаемые частоты (expected).

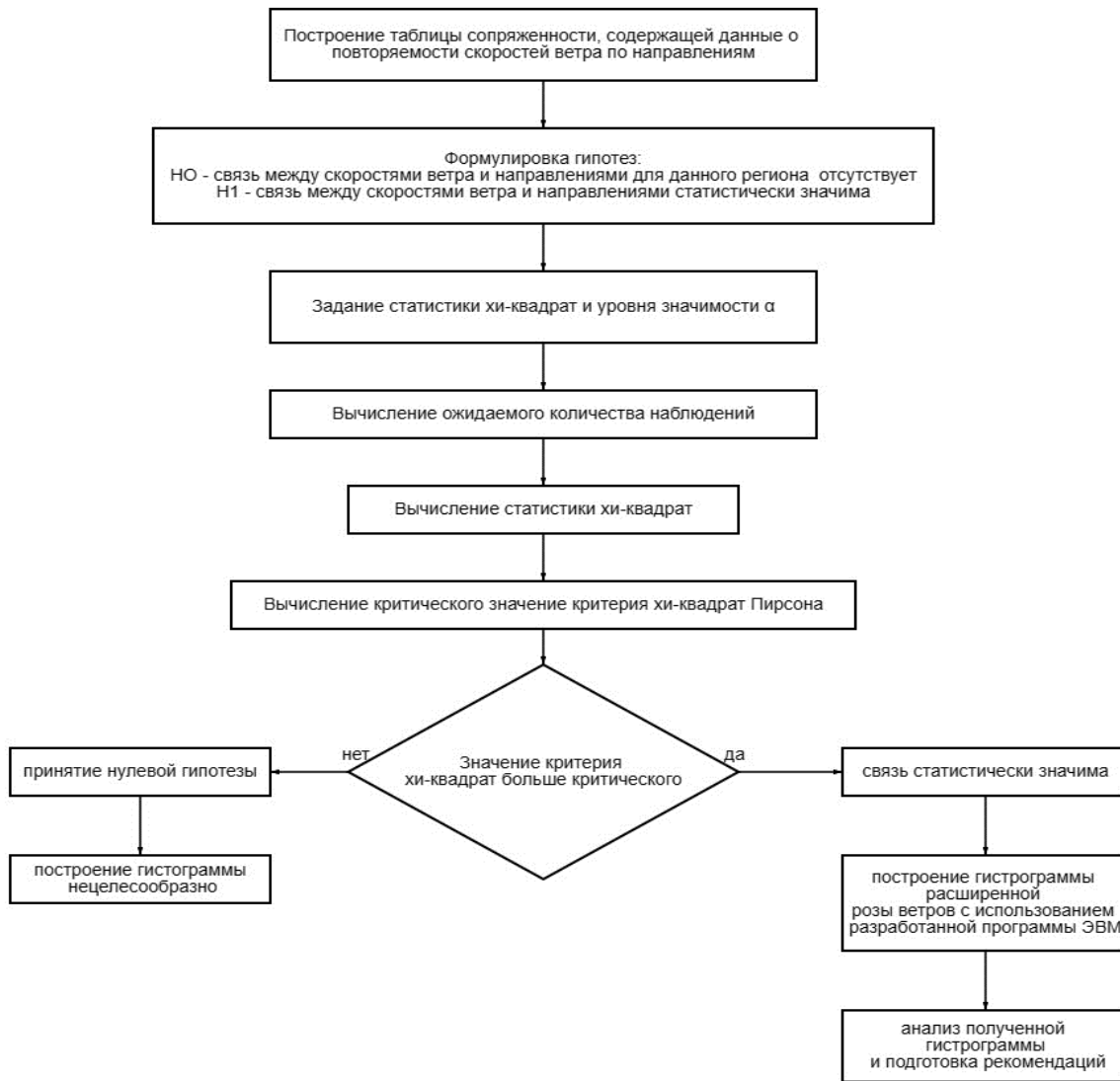


Рисунок 2 – Схема методики уточнения параметров климатической нагрузки

При необходимости статистика хи-квадрат рассчитывается с поправкой Йейтса

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(|O_{ij} - E_{ij}| - 0.5)^2}{E_{ij}}. \quad (2)$$

В рамках данной методики проверяется гипотеза о наличии статистически значимой связи между скоростями и направлениями ветра для ветров, имеющих скорость свыше 10 м/с. Если такая связь существует, то построение расширенной розы ветров и дополнительное исследование направлений, неблагоприятных с точки зрения появления ветров со скоростью свыше 10 м/с, считается целесообразным.

При наличии статистической связи для данного региона строится уточненная роза ветров с использованием специально разработанной

компьютерной программы (ЭВМ «Построение расширенной розы ветров для статистической обработки информации об экстремальных ветровых воздействиях», авторы: Поддаева О.И., Федосова А.Н.; номер свидетельства: RU 2017661771, дата регистрации: 12.07.2017).

Вторая часть комплексной методики состоит в дополнительном предварительном математическом анализе высоты снежного покрова. Высота снежного покрова с математической точки зрения является функцией многих переменных: температура, влажность, скорость ветра, направление ветра, плотности снега, общей продолжительности периода с температурой ниже 0⁰C, интенсивности осадков и т.д. В рамках данной методики проверяется наличие статистически значимой связи между высотой снежного и преобладающими направлениями ветра. Если такая связь существует, то есть для данного региона направление ветра вносит весомый вклад в величину снежного покрова, то преобладающие направления ветра должны быть учтены при построении схем снегоотложений для данного объекта в изыскиваемом регионе.

Методика формулируется следующим образом

– строится таблица сопряженности, содержащая данные (количество дней) о преобладающих направлениях ветра и высоте снежного покрова (Таблица 1);

Таблица 1 – Пример таблицы сопряженности для анализа снеговых воздействий

Высота снежного покрова	С	СЗ	З	ЮЗ	Ю	ЮВ	В	СВ	ШТИЛЬ

– формулируется нулевая гипотеза о существовании связи между высотой снежного покрова и направлениями ветра;

– задается статистика хи-квадрат и уровень значимости;

– вычисляются теоретические частоты;

– вычисляется значение статистики по формулам (1) или (2);

– вычисляется критическое значение хи-квадрат для принятого уровня значимости.

Применение методики дополнительного статистического анализа климатических воздействий позволяет оптимизировать и существенно уменьшить время подготовки и трудозатраты на проведение эксперимента на 10-15%.

В данной главе впервые в явном виде изложена и структурирована методика моделирования климатических воздействий на различные объекты транспортной инфраструктуры, приведены подробные алгоритмы динамических и статических, дренажных и весовых испытаний. Впервые предложена уникальная методика оценки объектов транспортной инфраструктуры на резонансное вихревое возбуждение, не требующая изготовления динамически подобных моделей. Методика моделирования климатических воздействий адаптирована для группы объектов транспортной инфраструктуры: здания вокзалов, аэропортовых комплексов, терминалы канатных дорог, ТПУ; мачты освещения и другие решетчатые ветропроницаемые сооружения; большепролетные мостовые сооружения. Точность определения параметров вынужденных колебаний увеличивается на 20-30% по сравнению с аналитическими расчетами, за счет формализации и оптимизации методики экспериментальных исследований время определения искомых характеристик уменьшается в 2-4 раза.

Третья глава посвящена теоретико-экспериментальному моделированию, включающему проектирование и создание масштабных моделей для проведения физических экспериментов, а также апробацию на примере как реально существующих, так и проектируемых сооружений.

На двух различных регионах РФ апробирована методика анализа климатических воздействий, приведенная во второй главе. Основываясь на данных метеообсерватории за десятилетний период в районе строительства объекта транспортной инфраструктуры, построены таблицы сопряженности для частот повторяемости различных скоростей ветра по направлениям, вычислено значение статистики хи-квадрат, для г. Владивостока обнаружена связь между преобладающими направлениями и скоростями ветра, построена гистограмма расширенной розы ветров с использованием специально разработанной программы (Рисунок 3).

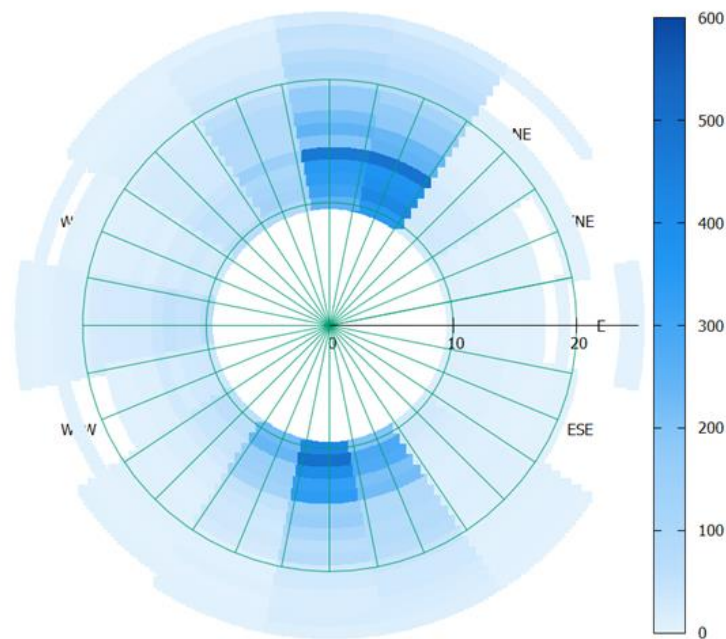


Рисунок 3– Расширенная роза ветров

Показано, что ветра экстремальных и средних скоростей могут иметь разные преобладающие направления. Установлены критические углы атаки ветра для выбранного региона, что может быть использовано на этапе предварительного климатического анализа при проектировании различных объектов транспортной инфраструктуры.

Методика анализа высоты снежного покрова была апробирована на двух регионах РФ: г. Москве и г. Петропавловске-Камчатском. Для г. Москвы установлено отсутствие статистически значимой связи между высотой снежного покрова и преобладающим направлением ветра. В то время как для г. Петропавловска-Камчатского существует статистически значимая связь между высотой снежного покрова и преобладающими направлениями ветра, т.е. для данного региона направление ветра вносит весомый вклад в величину снежного покрова, и преобладающие направления ветра должны быть учтены при построении схем снегоотложений для данного объекта в изыскиваемом регионе.

Проведена апробация методики моделирования ветровых воздействий на мостовые переходы на стадии эксплуатации и монтажа. Исследована аэродинамическая устойчивость различных типов мостовых конструкций. Для

выбранных мостовых переходов спроектирован и создан комплекс моделей для анализа их динамического поведения.

При этом все выполненные исследования являются уникальными и обладают своими особенностями:

1) исследование аэродинамической устойчивости пролетного строения в условиях плотной городской застройки. Оценка влияния существующего путепровода на проектируемый (модель №1, Рисунок 4).

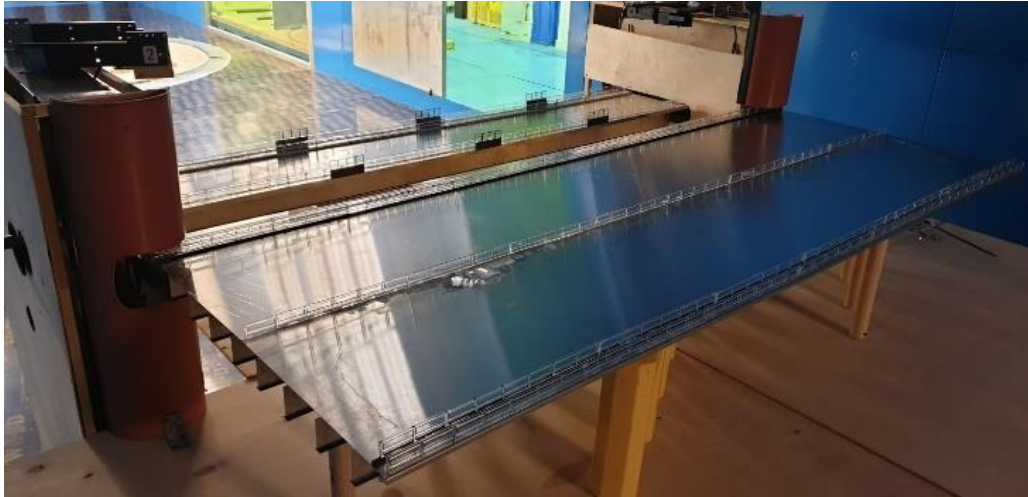


Рисунок 4 – Модель №1

Для модели №1 проведены статические и динамические испытания. Получены зависимости амплитуды колебаний ПС от скорости ветра при различных углах атаки ветра (рис.5).

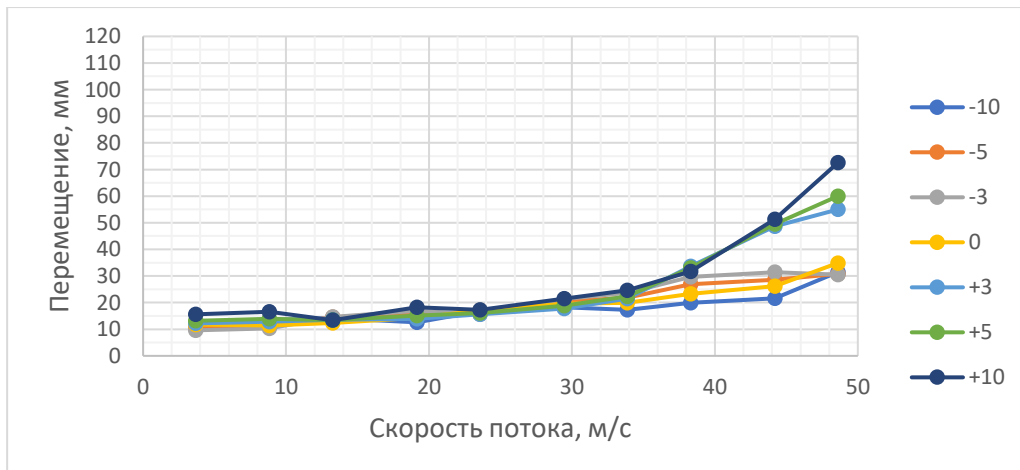


Рисунок 5 – Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра при различных углах атаки (существующий путепровод с наветренной стороны)

Для Модели №1 дополнительно выполнена оценка влияния автомобильного трафика (рис. 6) и снеговых отложений на барьерных заграждениях на аэродинамическую устойчивость (рис.7).



Рисунок 6 – Оценка влияния автомобильного трафика и снеговых отложений на барьерных заграждениях на аэродинамическую устойчивость

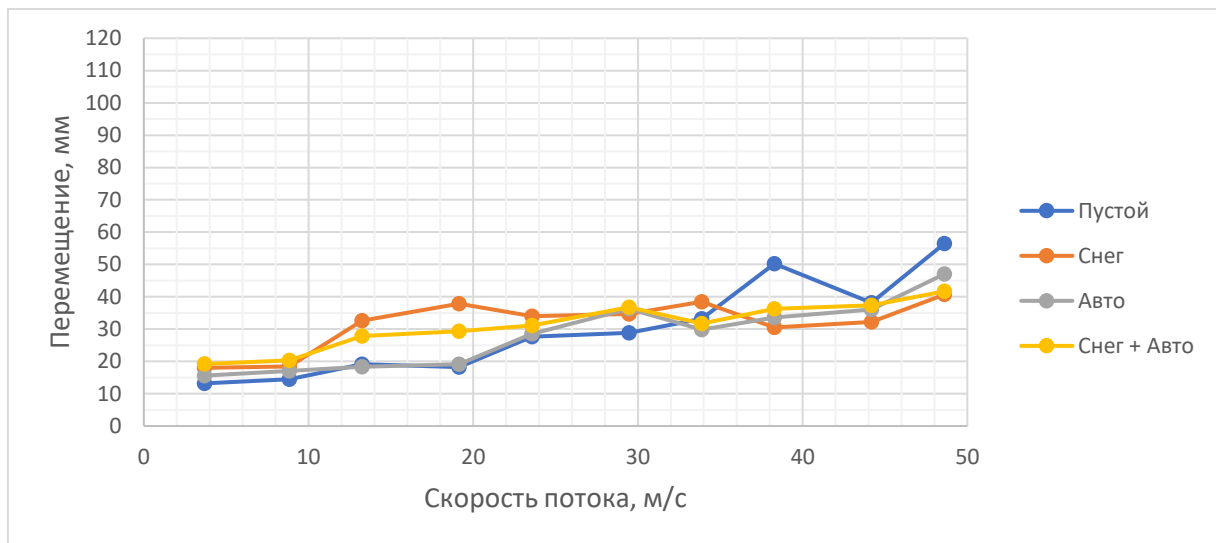


Рисунок 7 – Оценка влияния автомобильного трафика и снеговых отложений на барьерных заграждениях на аэродинамическую устойчивость

Установлено, что наличие автомобильного трафика на пролетном строении и снеговых отложений на барьерных заграждениях не оказывает существенного влияния на аэродинамическую устойчивость;

2) исследование аэродинамической устойчивости моста с двумя параллельными пролетными строениями, расположенными в непосредственной близости друг от друга. Оценка возможности возникновения бафтинга (модель №2, Рисунок 8).



Рисунок 8 – Модель №2

Исследования выполнены для углов атаки $\alpha = -5^\circ, -3^\circ, 0^\circ, +3^\circ, +5^\circ$. Вертикальными линиями на графиках на рисунке 9 указаны пороговые значения скорости потока (расчетная – желтая линия – и критическая скорость флаттера – красная линия).

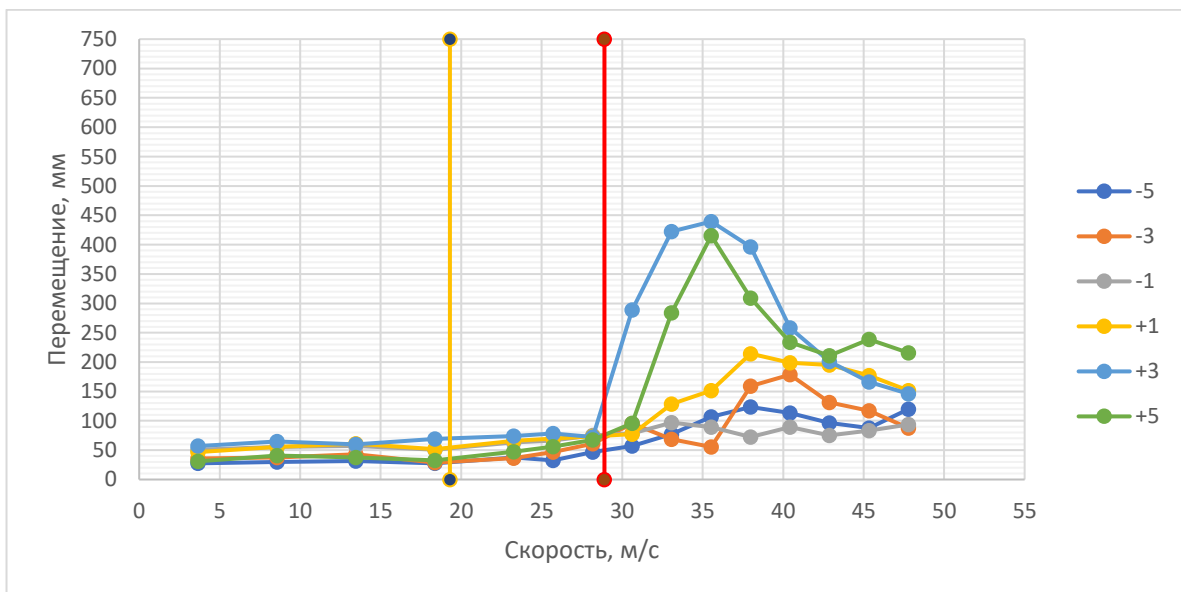


Рисунок 9 – Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения при различных углах атаки

Динамические испытания модели с $\delta = 0,02$ не выявили явления вихревого возбуждения на скоростях ветра в диапазоне до 19,3 м/с (расчетное значение скорости ветра с учетом коэффициента запаса 1.4). Явления галопирования и флаттера в диапазоне скоростей до 28,9 м/с (критическая скорость флаттера с учетом коэффициента запаса 1.5 согласно п. 6.24 СП 35.13330.2011) не зафиксированы. Установка дополнительных обтекателей не требуется;

3) исследование влияния орографии и угла скольжения на аэродинамическую устойчивость пролетного строения (модель 3, Рисунок 10).

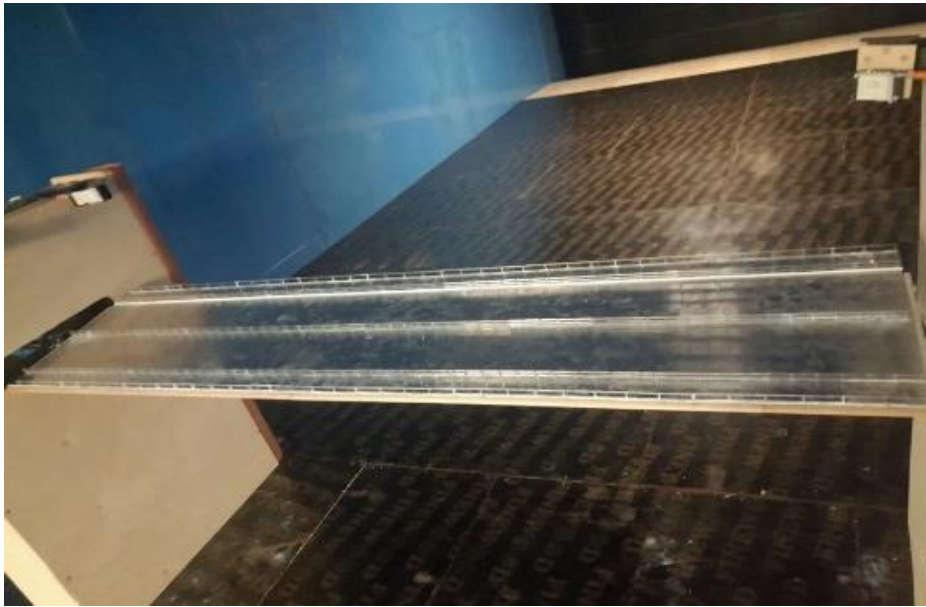


Рисунок 10 – Модель №3

Учитывая нетиповую ориентацию пролетного строения относительно русла реки (мост расположен под углом около 43° к продольной оси русла), были проведены дополнительные экспериментальные исследования с целью уточнения полученных результатов и выявления наиболее неблагоприятного направления ветрового потока (угла скольжения) (рис. 11-12).

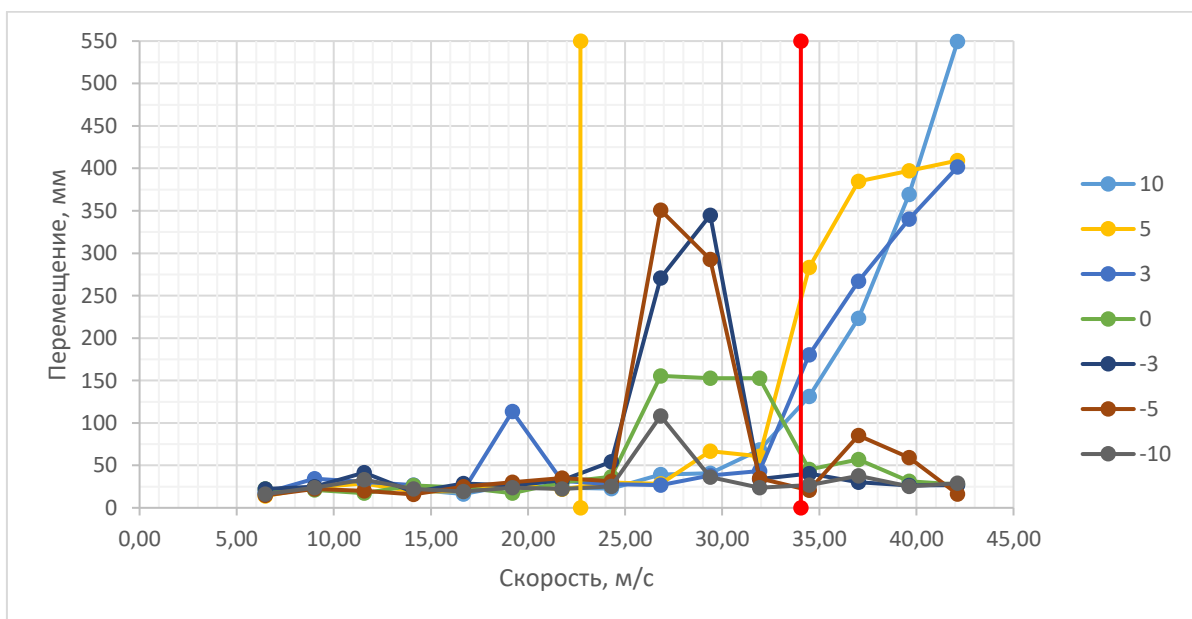


Рисунок 11 – Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, угол скольжения 0°

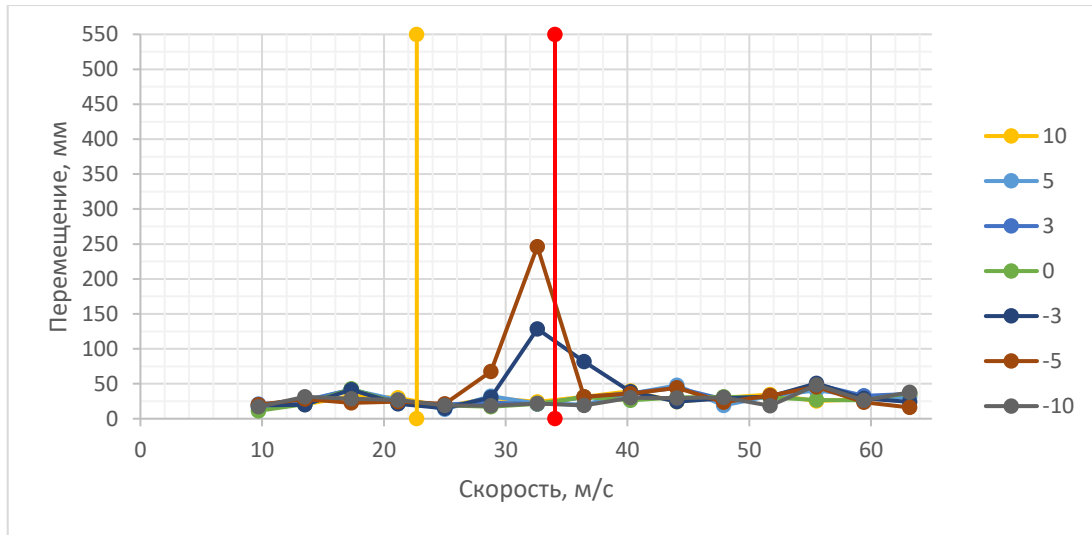


Рисунок 12 – Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, угол скольжения 43°

На основании результатов испытаний установлено, что при увеличении угла скольжения до значения 43° (соответствует ориентации пролетного строения относительно русла реки) устойчивость пролетного строения в ветровом потоке повышается, амплитуда колебаний снижается (при угле атаки -5° амплитуда колебаний снизилась с 350 мм до 250 мм).

Апробирована методика экспериментального исследования на ветровые воздействия мостового перехода на стадии монтажа. В связи с особенностями метода возведения пролетного строения существенно увеличивается восприимчивость конструкции к воздействию ветровых нагрузок.

Пунктирной линией обозначены предельно допустимые значения амплитуды колебаний. Можно отметить, что измеренные значения превышают предельно допустимые при скорости набегающего потока около 40 м/с, в то время как расчетная скорость ветра для данного случая 27,5 м/с, следовательно, конструкция моста соответствует условиям безопасности и эксплуатационной надежности. Пример результатов испытаний приведен на Рисунок 13.

Апробирована методика моделирования ветровых воздействий на различные объекты транспортной инфраструктуры. Исследовано ветровое воздействие на аэровокзальный комплекс, находящийся на реконструкции (Рисунок 14). По результатам испытаний определены аэродинамические коэффициенты c_x , c_y , c_{mz} (Рисунок 15).

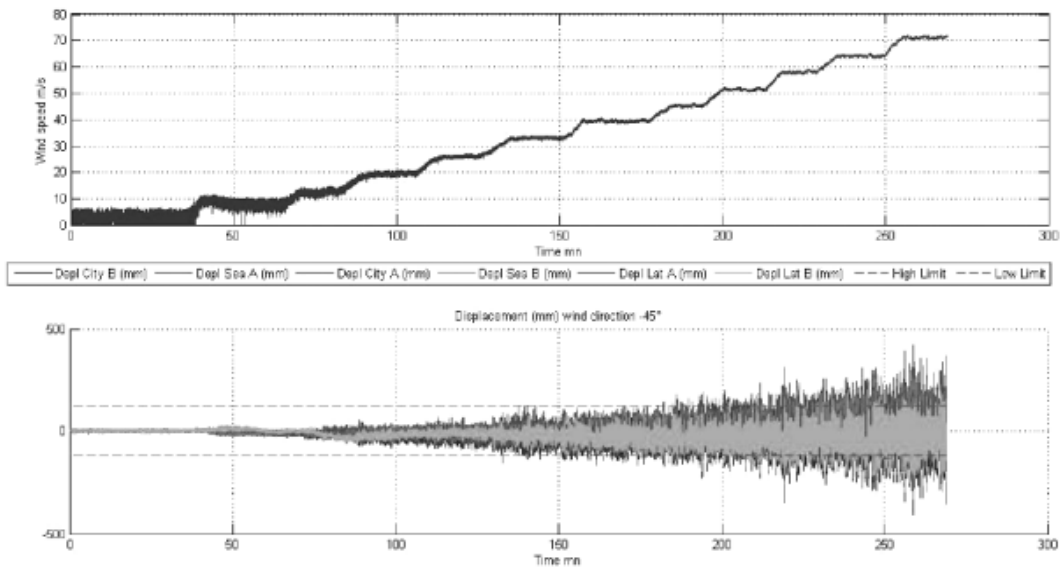


Рисунок 13 – Амплитуды вертикальных и поперечных колебаний



Рисунок 14 – Исследуемый объект (аэровокзальный комплекс)

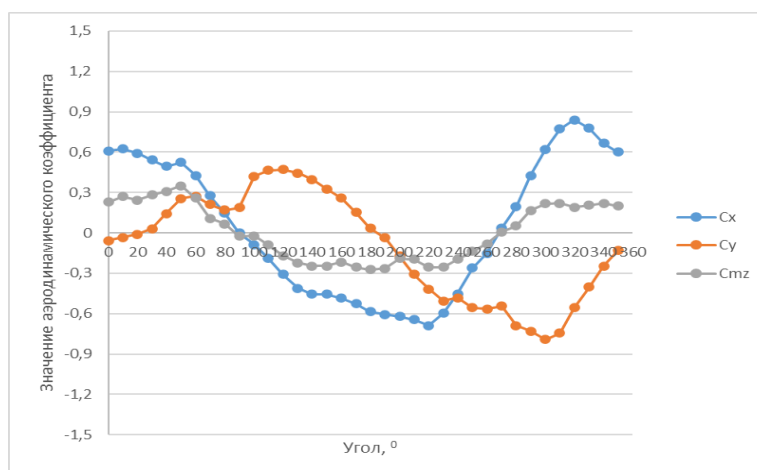


Рисунок 15 – График зависимости аэродинамических коэффициентов

C_x , C_y , C_{mz} при изменении угла атаки от 0° до 350°

Интегральная пульсационная составляющая безразмерных компонент аэродинамической силы, измеренных на модели, составляет порядка 25% от средних значений.

Апробирована методика моделирования ветровых воздействий на решетчатую конструкцию (Рисунок 16 а). В результате экспериментальных исследований получены значения аэродинамических коэффициентов при различных углах атаки ветра.

Апробирована методика исследования на резонансное вихревое возбуждение, не требующая изготовления динамически подобной модели. Данная методика основана на изучении потока за моделью. Было проведено исследование колебаний срывного потока за моделью. Данное исследование не выявило наличие установившихся колебаний (рис. 16 б).

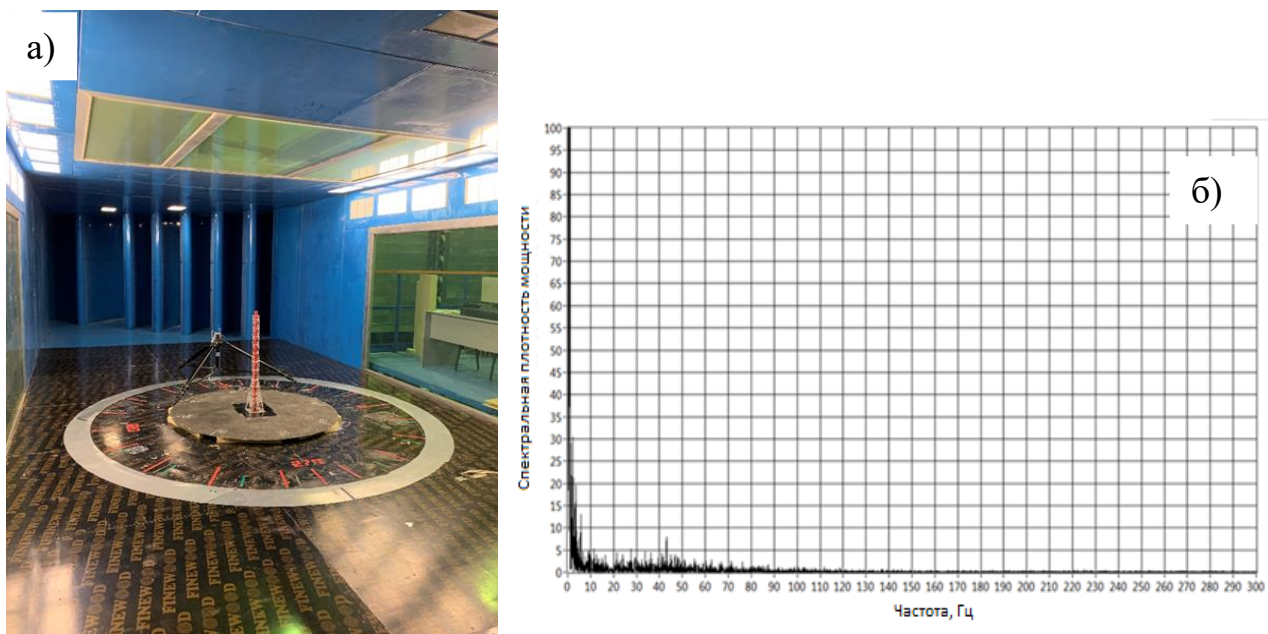


Рисунок 16 – Модель исследуемого объекта: а) в рабочей зоне аэродинамической трубы, б) спектральная характеристика колебаний срывного потока

Проведена апробация методики моделирования снеговых воздействий, входящая в комплексную методику анализа климатических воздействий, на различные объекты транспортной инфраструктуры. Смоделировано влияние снеговых воздействий на уникальный объект транспортной инфраструктуры – первую в мире трансграничную канатную дорогу Благовещенск–Хэйхэ (Рисунок 17).

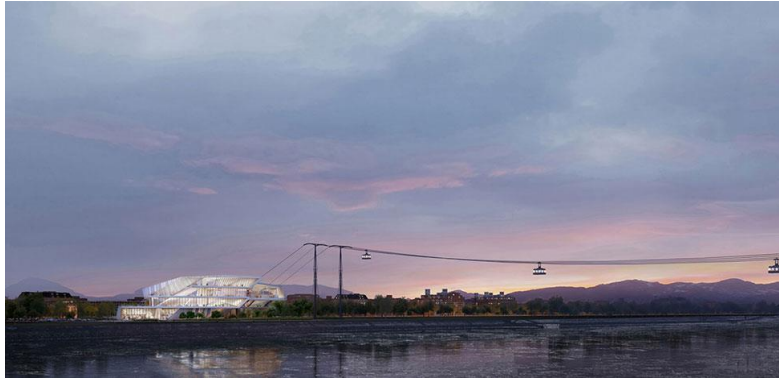


Рисунок 17– Исследуемый объект

Моделирование проводится в соответствии с методикой, представленной во второй главе. В эксперименте выполнена полная круговая экспозиция по направлению ветра с шагом 45° . На рис. 18 приведены результаты фотофиксации картин распределения снегоотложений.



Рисунок 18 – Характерные зоны снеговых отложений, углы набегающего потока 0° (С) и 270° (В)

Проведенные в данной главе исследования позволили расширить перечень опасных факторов, влияющих на техносферную безопасность критически важных объектов транспортной инфраструктуры на различных этапах их жизненного цикла.

Четвертая глава посвящена инженерному методу верификации результатов теоретико-экспериментального моделирования для различных критически важных объектов транспортной инфраструктуры.

Проведена верификация методики экспериментальных исследований аэродинамической устойчивости большепролетного мостового сооружения. Полученные экспериментальные результаты по исследованию пролетного строения на аэродинамическую устойчивость сопоставлены с аналитическими методиками расчета: инженерный расчет определения критической скорости вихревого возбуждения по формулам ГОСТ Р 59625-2022 и оценка возможности возникновения изгибно-крутильного флаттера на основании теории Теодорсена. Сама функция Теодорсена имеет вид

$$C(k) = F(k) + iG(k), \quad (3)$$

где $k = \frac{\bar{S}}{2}$, $F(k)$ и $G(k)$ – действительное и мнимое значения функции Теодорсена.

Расчет критической скорости флаттера \bar{S} выполняется итерационно. Первоначальное значение приведённой частоты флаттера задается по формуле

$$\bar{S} = \frac{0,85 \left(1 + \frac{\omega_{изг}}{\omega_{кр}}\right)}{\frac{mr}{\rho B^3} \left(1 + \left(\frac{\omega_{изг}}{\omega_{кр}}\right)^2\right)}, \quad (4)$$

где m – погонная масса, кг/м; r – радиус инерции сечения, м; ρ – плотность воздуха, кг/м³; B – ширина сечения, м; $\omega_{изг}$ – круговая частота собственных колебаний в вертикальной плоскости, рад/сек; $\omega_{кр}$ – круговая частота собственных крутильных колебаний, рад/сек.

Результаты экспериментальных исследований подтверждаются аналитическими расчетами как качественно, так и количественно.

Приведена верификация методики экспериментального моделирования снегопереноса для классического примитива (модели куба) и реального сооружения. Установлено, что для назначения снеговой нагрузки на кровлю с большой степенью достоверности можно использовать методику, подразумевающую нанесение тонкого слоя модельного порошка перед экспозицией в ветровом потоке. Толстый слой модельного порошка требует продувки при более высокой скорости, поскольку адгезия частиц между собой выше, чем между частицей и твердой поверхностью модели.

В результате нанесения толстого слоя на поверхность кровли в некоторых случаях сглаживает конструктивные неровности поверхности кровли и меняет структуру ветрового потока над кровлей.

Рассмотренная методика не затрагивает влияния тепловых потоков на таяние снега и унос некоторой массы атмосферных осадков. Методика индицирует возможную интерференцию между строительными объектами и ее влияние на перераспределение снеговой нагрузки.

В результате верификации методики снегоотложений на реальном сооружении установлено, что по результатам выполненного эксперимента, а также инженерного анализа нормативных схем распределения снеговой нагрузки, представляющих более консервативный подход, основанный на натурных наблюдениях, допустимо выполнять назначение снеговой нагрузки на кровельное покрытие с учетом преобладающих направлений ветра в районе строительства. Для зданий и сооружений, форма которых существенно отличается от рассматриваемых в нормативных документах примитивов, рекомендуется в процессе разработки рекомендаций использовать данные по объектам аналогам, полученные в результате мониторинга или опубликованные в научно-технической литературе.

В **пятой главе** представлены методы и средства снижения влияния эксплуатации критически важных объектов транспортной инфраструктуры на окружающую среду, сами сооружения и эксплуатационные службы.

Приведена методика экспериментального исследования распространения пылевых загрязнений на территории. Особенностью экспериментального исследования распространения пылевых загрязнений на территории объектов транспортной отрасли в большинстве задач является достаточность достижения качественного, а не количественного результата.

Апробация данной методики выполнена на транспортном узле угольного терминала. На основании результатов экспериментальных исследований, а также данных гидрометеорологических наблюдений выбран оптимальный вариант размещения пылезащитных экранов (Рисунок 19).



Рисунок 19– План размещения пылезащитных экранов

Представлена разработка системы защиты окружающей среды и транспортных магистралей от техногенных воздействий на основе обеспечения аэродинамической устойчивости с помощью использования различных видов обтекателей и дефлекторов.

В транспортном строительстве для шумозащиты применяются звукопоглощающие и звукоотражающие панели, которые воспринимают и основную часть ветровой нагрузки, при этом несущие конструкции обычно бывают трех видов (Рисунок 20): прямая стойка, прямая стойка с козырьком, криволинейная стойка. Одним из важных требований при проектировании шумозащитных экранов является обеспечение безопасности конструкции, что регламентирует СП 338.1325800.2018 «Защита от шума для высокоскоростных железнодорожных линий» и СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Для экспериментальных исследований были изготовлены две модели (первого и второго типов), реальная высота равнялась 4 м.

С учётом рабочей части аэродинамической трубы был выбран максимально возможный масштаб моделей, что позволило обеспечить условие по коэффициенту блокировки ($S_c < 10\%$). Характерные скорости потока, при которых определялось локальное давление, лежит в диапазоне от 10 м/с до 13 м/с. При анализе результатов характер автомодельности наблюдался при скоростях, близких к 13 м/с. В ходе экспериментальных исследований физических моделей по направлениям в 0° , 30° ,

60°, 300° и 330° было выявлено, что наибольшее среднее давление возникает при угле атаки 0°.

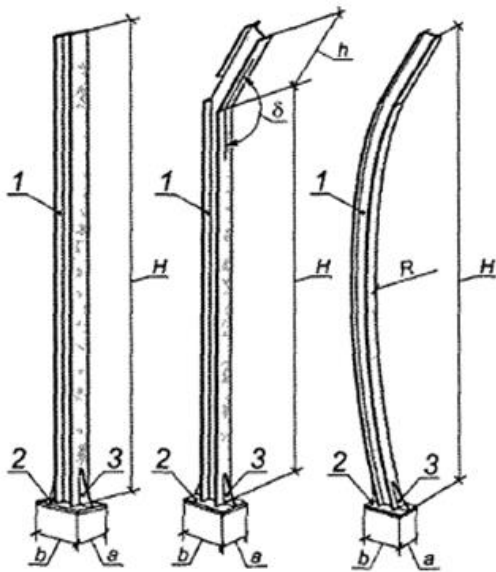


Рисунок 20 – Формы поперечных сечений и макеты исследуемых конструкций

Проведено исследование влияния проницаемости шумозащитных экранов на аэродинамическую устойчивость пролетного строения (Рисунок 21).

Результаты исследования представлены как график перемещения ПС в полном масштабе в зависимости от средней скорости ветра также в полном масштабе. Отдельные графики выполнены для вертикального перемещения (изгибные колебания) и угловых перемещений (крутильные колебания) для двух вариантов конструкции защитного экрана – сплошной и проницаемой (Рисунок 22).



Рисунок 21– Модель пролетного строения

Динамические испытания модели с $\delta = 0,02$ показали, что проницаемая конструкция защитного экрана предпочтительней с точки зрения аэродинамики пролетного строения.

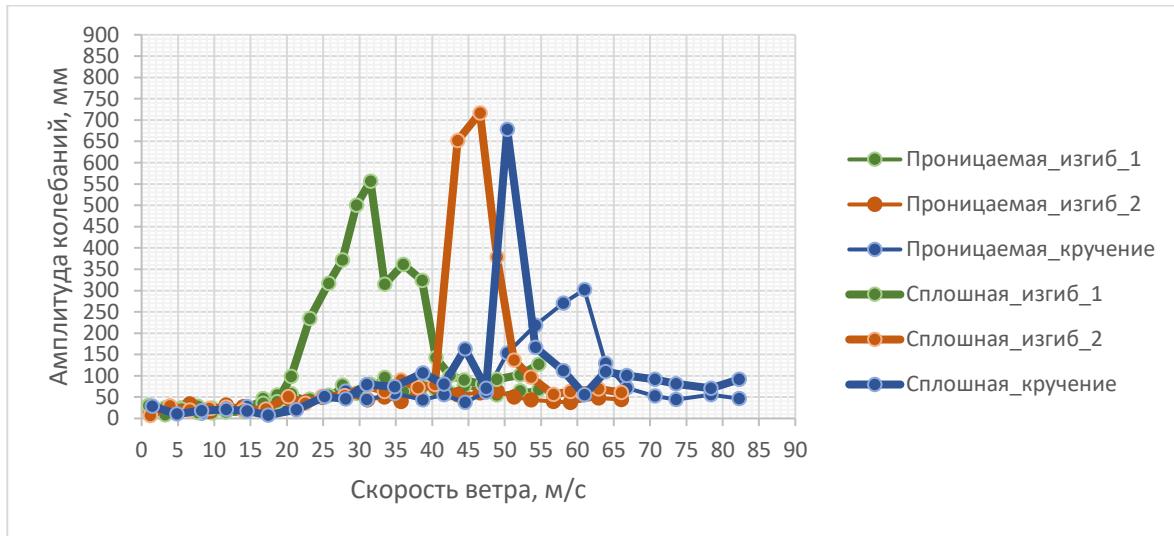


Рисунок 22– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, направление потока $\alpha = 0$

Одним из опасных факторов, влияющих на техносферную безопасность критически важных объектов инфраструктуры, является образование и возможное падение наледи. Данное направление актуально из-за проблем со стандартизацией гололедных нагрузок, в связи с разнообразием топографических и климатических условий в различных регионах нашей страны. Появляющаяся дополнительная гололедная нагрузка важна из-за увеличения статической составляющей действующих сил, из-за изменения собственных частот элементов сооружения, что может являться определяющим при пропуске транспортных средств, из-за появления дополнительного эксцентриситета для продольных усилий, что может привести к галопированию сжатых и растянутых элементов, а падение льда представляет опасность для работников, пешеходов и экипажей (Рисунок 23).

При оценке профессиональных рисков при проведении работ на искусственных сооружениях требуется учитывать, что интенсивность образования гололедной облойки зависит от характера окружающей местности и от характерного геометрического размера поперечного сечения элемента конструкции.



Рисунок 23– Мостовые переходы, подверженные возникновению дополнительной гололедной нагрузки: а) вантовый, б) ферменный

Поскольку образование дополнительной гололедной нагрузки напрямую связано с температурными воздействиями, то имеет смысл построить распределение температурных полей в непосредственной близости от рассматриваемого элемента конструкции. Для этого предлагается провести линеаризацию искомой функции как по пространственной координате, отсчитываемой вдоль элемента фермы, так и по времени. Для линеаризации по координате примем сетку, состоящую из m узлов:

$$x_{\mu} = \frac{1}{2}(z_{\mu} + 1); z_{\mu} = \cos \chi_{\mu}; \chi_{\mu} = \frac{(2\mu - 1)\pi}{2m}; \mu = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

а затем используем интерполяционную формулу для определения второй производной по координате

$$q(x) = \sum_{\mu=1}^m \frac{T_m(x)(x-1)xq_{\mu}}{m \frac{(-1)^{\mu-1}}{\sin \chi_{\mu}} (x_{\mu}-1)x_{\mu}(z-z_{\mu})}, q_{\mu} = q(x_{\mu}), z = 2x - 1. \quad (6)$$

Для линеаризации по времени используем сетку, состоящую из k узлов:

$$t_v = \frac{1}{2}(z_v + 1), z_v = \cos \chi_v, \chi_v = \frac{(2v - 1)\pi}{2k}, v = 1, 2, \dots, k. \quad (7)$$

Для определения производной, так же как и для дифференцирования по координате, применим интерполяцию с помощью многочлена:

$$q(t) = \sum_{v=1}^k \frac{T_m(t)tq_v}{m \frac{(-1)^{v-1}}{\sin \chi_v} t_v(z-z_v)}. \quad (8)$$

Решение задачи распределения температурного поля вблизи элемента конструкции позволяет определить критический уровень температуры, который наряду с воздействием вибрационной нагрузки может привести к откалыванию

наледи и падении ее фрагментов вниз, что свидетельствует о возникновении опасности для работников и транспортных средств, дополнительной ударной нагрузки для объекта транспортной инфраструктуры и появлении опасных зон.

Определен критический уровень внешних температур и внешних динамических воздействий, при которых возможен откол гололедной облоймы, определены опасные зоны на мостовых переходах с точностью до 0,5 метра, прогнозируемое время ограничения движения уменьшается в 2-3 раза.

Представлена методика выявления опасных зон при проведении работ. Использовано распределение безразмерного параметра Q_{crit} – относительной скорости ветра:

$$Q_{crit} = \frac{V_{max}}{V_p}, \quad (9)$$

где V_{max} – максимальная (по времени) локальная скорость потока; V_p – скорость потока воздуха, измеренная на большом удалении от рассматриваемого объекта транспортной инфраструктуры в невозмущенном потоке.

Приведен пример выявления опасных зон при производстве работ на объектах транспортной инфраструктуры ниже (Рисунок 24).

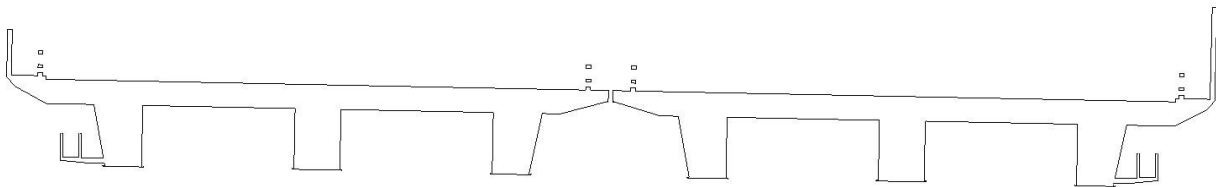
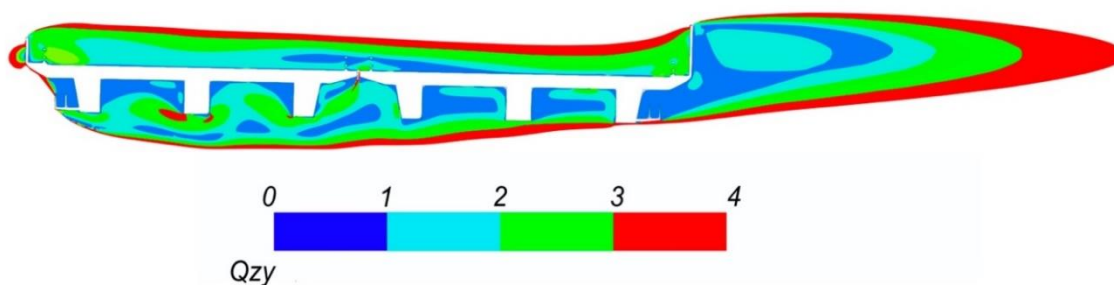


Рисунок 24– Поперечное сечение мостового перехода

Распределение безразмерного параметра Q_{crit} в различных сечениях моста приведено на Рисунок 25 а и б.



а)

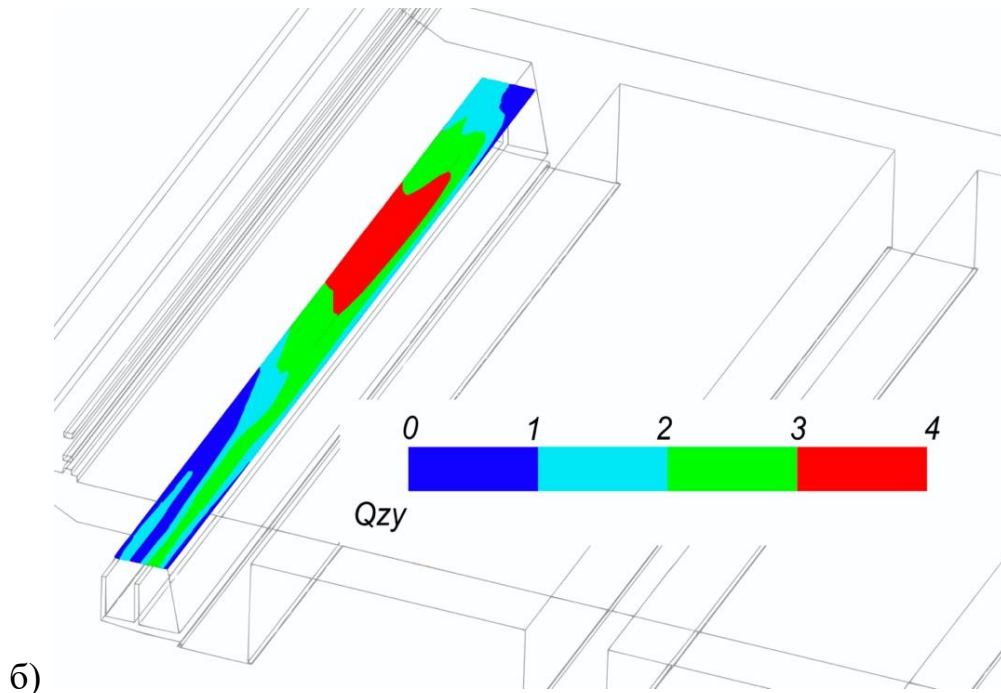


Рисунок 25– Относительная скорость Q_{crit} : а) сечение ZOY, б) сечение XOY

Неблагоприятные места для нахождения работников при проведении работы выделены красным. Выполнение работ на этих зонах при определенных погодных условиях может привести к производственному травматизму. Для обеспечения техносферной безопасности, минимизации производственного травматизма на данном объекте транспортной инфраструктуры необходимо предусмотреть комплекс мероприятий по компенсации нежелательных аэродинамических эффектов (установка обтекателей, дефлекторов и т.д.).

Результаты исследований, представленных в данном разделе, позволят в 2-3 раза сократить время нахождения работника в непосредственной близости от опасной зоны при выполнении технологических процессов ремонта и мониторинга, а это, в свою очередь, позволит увеличить пропускную способность однопутного мостового перехода до 10% за счет снижения числа ограничений по скорости экипажей.

Предлагаемые методы и средства уменьшают негативное влияние эксплуатации критически важных объектов транспортной инфраструктуры на окружающую среду, включая решения по снижению шума, снеговых и гололедных отложений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных автором научных исследований и полученных результатов были проанализированы техносферные воздействия на критически важные объекты транспортной инфраструктуры, на основе выполненной классификации предложена система оценки воздействий на объекты и их отдельные элементы на различных этапах жизненного цикла, разработаны и реализованы методы и алгоритмы проведения теоретико-экспериментального моделирования климатических и техногенных воздействий, позволяющие оценить динамическое поведение объекта инфраструктуры в разных условиях строительства и эксплуатации, разработаны технические решения для безопасного выполнения работ, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны в области техносферной безопасности транспортных систем.

Основные научные результаты выполненного исследования, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки заключаются в следующем:

1. Предложена система классификации техносферных воздействий, основанных на ветровых и сопутствующих воздействиях (воздействие агрессивных сред, влаги, снега, гололедной нагрузки, химически активных воздействий, ветровые потоки с абразивными частицами и т.д.) на критически важные объекты транспортной инфраструктуры, на основе которой сформулирован подход к оценке таких воздействий и возможных сценариев поведения исследуемого объекта на различных этапах его жизненного цикла. Работа всей системы обеспечения техносферной безопасности представлена в виде комплекса, в котором присутствуют параметры, определяющие вклад каждого значимого вредного и опасного фактора для всего объекта, отдельного рабочего места, зоны инженерной и транспортной инфраструктуры.

2. Предложен и реализован алгоритм моделирования объектов транспортной инфраструктуры, основанный на экспериментальных исследованиях с учетом ветровой, снеговой, гололедной нагрузки, воздействия агрессивных сред, включающий теоретико-экспериментальное моделирование и создание физических макетных образцов для проведения натурных

экспериментов, уменьшающий вдвое время подготовки и проведения эксперимента. Рассмотрены группы объектов транспортной инфраструктуры: здания вокзалов, аэропортовых комплексов, терминалы канатных дорог, ТПУ; мачты освещения и другие решетчатые ветропроницаемые сооружения; большепролетные мостовые сооружения. Точность определения параметров вынужденных колебаний увеличивается на 20-30% по сравнению с аналитическими расчетами, за счет формализации и оптимизации методики экспериментальных исследований время определения искомых характеристик уменьшается в 2-4 раза.

3. Предложен и апробирован комплекс моделей для описания динамического поведения критически важных объектов транспортной инфраструктуры, включая мостовые переходы, с учетом техносферных воздействий различного типа (рассматриваются снеговые, ветровые, гололедные воздействия, воздействия агрессивных сред в различном агрегатном состоянии, переносимых ветровыми потоками), в его основе лежат экспериментальные и аналитические схемы. Апробация выполнена с учетом различных факторов, не рассматривающийся в актуальных нормативных документах, но, при этом оказывающих существенное влияние на динамическое поведение объектов транспортной инфраструктуры. Выполнена оценка возникновения явлений аэроупругой неустойчивости для спаренных пролетных строений, расположенных на минимальном расстоянии друг от друга (менее 1 м). Проведены исследования динамического поведения большепролетных мостовых конструкций при различных углах скольжения ветрового потока и различной проницаемости защитных экранов.

4. Сформулирован перечень опасных факторов, влияющих на техносферную безопасность критически важных объектов транспортной инфраструктуры на различных этапах их жизненного цикла на основе анализа аэродинамических, гололедных и сопутствующих воздействий. Определен критический уровень внешних температур и внешних динамических воздействий, при которых возможен откол гололедной обоймы, определены

опасные зоны на мостовых переходах с точностью до 0,5 метра, прогнозируемое время ограничения движения уменьшается в 2-3 раза.

6. Разработаны технические решения безопасного выполнения работ на критически важных объектах инфраструктуры при различных климатических и техногенных воздействиях на разных этапах жизненного цикла, с учетом механизма зарождения и развития опасных зон на рассматриваемом объекте и в непосредственной близости от него.

– Использование предлагаемых подходов дает физически адекватные картины распространения воздушных потоков, в том числе, содержащих твердые и жидкие фракции агрессивных сред, определяя расположение и состояние опасных зон на самом объекте транспортной инфраструктуры и в непосредственной близости от него в зависимости от сезона и режима эксплуатации.

– Предлагаемые решения ускоряют процесс проектирования и сбора необходимой статистической информации в 3-4 раза.

– Разрабатываемые окна для выполнения технологических процессов ремонта и мониторинга в 2-3 раза сокращают время нахождения работника в непосредственной близости от опасной зоны.

– Идентификация опасных зон на этапе их зарождения, контроль их состояния и развития увеличивает пропускную способность однопутного мостового перехода до 10% за счет снижения числа ограничений по скорости экипажей.

7. Разработаны методы и средства, уменьшающие негативное влияние эксплуатации критически важных объектов транспортной инфраструктуры на окружающую среду, включая решения по снижению шума, вибрации, снеговых и гололедных отложений.

8. Разработан и апробирован на большинстве решенных в исследовании задач инженерный метод верификации результатов теоретико-экспериментального моделирования для критически важных объектов транспортной инфраструктуры.

– Использование метода верификации совместно с современными информационно-вычислительными комплексами и физических испытаний макетов сооружений в аэродинамических трубах решает многие задачи техносферных воздействий методами экспериментального моделирования.

– Использование предлагаемых подходов на этапе проектирования на 40% увеличивает долговечность объектов транспортной инфраструктуры.

9. На основе анализа, апробации и внедрения полученных результатов данного исследования сформулированы практические рекомендации по использованию предлагаемых методов, моделей и алгоритмов для обеспечения техносферной безопасности объектов транспортной инфраструктуры на разных этапах жизненного цикла, а также по учету формируемых опасных зон на объекте и вблизи него при выполнении различных технологических процессов.

10. Перспективы дальнейшего исследования заключаются в создании единой автоматизированной цифровой системы поддержки проектирования, строительства и эксплуатации критически важных объектов транспортной инфраструктуры с точки зрения обеспечения техносферной безопасности транспортной системы на всех этапах жизненного цикла.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

а) в рецензируемых научных изданиях

1. Гувернюк, С.В. Вычислительная аэродинамика строительных сооружений. Задачи и методы / С.В. Гувернюк, О.О. Егорычев, О.И. Поддаева [и др.] // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2011. – № 2-2. – С.113.
2. Гувернюк, С.В. Численное и физическое моделирование ветрового воздействия на группу высотных зданий / С.В. Гувернюк, О.О. Егорычев Поддаева О.И. [и др.] // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2011. – № 3-1. – С. 185-191.
3. Егорычев, О.О. Проектирование и изготовление аэроупругой модели моста для проведения аэродинамических экспериментов / О.О. Егорычев, П.С. Чурин, О.И. Поддаева // Научное обозрение. – 2015. – № 9. – С. 111-114.

4. Егорычев, О.О. Экспериментальное исследование сило-моментных ветровых нагрузок на высотные здания / О.О. Егорычев, П.С. Чурин, О.И. Поддаева // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 9. – С. 28-30.
5. Кубенин, А.С. Исследование аэродинамики протяженных конструкций на основе расчетно-экспериментального подхода / А.С. Кубенин, А.Н. Федосова, О.И. Поддаева // Научное обозрение. – 2015. – № 21. – С. 79-84.
6. Локтев, А.А. Ветровые воздействия на объекты транспортной инфраструктуры, относящиеся к сооружениям повышенного уровня ответственности / А.А. Локтев, В.В. Королев, О.И. Поддаева [и др.] // Транспорт Урала. – 2022. – № 3 (74). – С. 16-21.
7. Локтев, А.А. Исследование мостового перехода высокоскоростной железнодорожной магистрали при аэродинамических воздействиях / А.А. Локтев, В.В. Королев, О.И. Поддаева [и др.] // Транспорт Урала. – 2022. – № 3 (74). – С. 55-59.
8. Локтев, А.А. Математическое моделирование аэродинамического поведения антенномачтовых сооружений при организации связи на железнодорожном транспорте / А.А. Локтев, В.В. Королев, О.И. Поддаева [и др.] // Вестник Научно-исследовательского Института железнодорожного транспорта. – 2018. – Т. 77, № 2. – С. 77-83.
9. Мацевич, Т.А. Анализ системы «Здание (сооружение) - строительная конструкция - строительный материал». Общая и частные задачи / Т.А. Мацевич, О.И. Поддаева, А.Н. Гришина, Д.А. Корольченко // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 4 (45). – С. 22-33.
10. Помелов, В.Ю. Оценка ветрового воздействия на крупногабаритные промышленные складские помещения / В.Ю. Помелов, О.И. Поддаева, П.С. Чурин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 12. – С. 203-206.
11. Поддаева, О.И. Аэродинамические испытания мостовых конструкций / О.И. Поддаева, П.С. Чурин // Научное обозрение. – 2013. – № 9. – С. 321-324.
12. Поддаева, О.И. Влияние точечного высотного строительства на аэродинамические характеристики существующей застройки / О.И. Поддаева,

О.О. Егорычев, Ж.И. Нагорнова // Строительство: наука и образование. – 2019. – №1. – С. 1-13.

13. Поддаева, О.И. Влияние шумозащитных экранов на аэродинамическую устойчивость большепролетных мостовых конструкций / О.И. Поддаева, А.Н. Федосова, П.С. Чурин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 12. – С. 215-217.

14. Поддаева, О.И. Возможности прогнозирования появления опасных зон при аэродинамическом воздействии на большепролетные мостовые конструкции / О.И. Поддаева // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 3. – С.100-106.

15. Поддаева, О.И. Проведение экспериментальных исследований ветрового воздействия на шумозащитные экраны вблизи высокоскоростных железных дорог / О.И. Поддаева, Е.С. Ашпиз, А.Н. Федосова, Ю.С. Грибач // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 2. – С. 8-13.

16. Поддаева, О.И. Экспериментальное исследование ветрового воздействия на строительные конструкции в аэродинамической трубе с малой рабочей частью / О.И. Поддаева, А.Н. Федосова, С.А. Саврасов, А.Т. Каграманян // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 5. – С. 140-143.

17. Чурин, П.С. Визуализация движения воздушного потока / П.С. Чурин, О.И. Поддаева // Научное обозрение. – 2015. – № 9. – С. 106-110.

18. Чурин, П.С. Проектирование макетов уникальных зданий и сооружений в экспериментальной аэродинамике / П.С. Чурин, О.И. Поддаева, О.О. Егорычев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 332-335.5

б) в изданиях, включенных в международные базы научного цитирования

Scopus u Web of Science:

19. Ageev, N. Numerical simulation of the wind resonance of the bridge based on Scale-resolving approaches / N. Ageev, O. Poddaeva, P. Churin, A. Fedosova // Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies. 2021. – 1413. – С. 93-104. – DOI : 10.1007/978-3-030-78759-2_7.

20. Ageev, N. Numerical and experimental assessment of frequencies and amplitudes when swirling excitation of bending vibrations of construction structures / N. Ageev,

O. Poddaeva, P. Churin, A. Fedosov, O. Egorychev // *Science and Engineering*. – 2020. – 869(5). – C. 1-10. – DOI : 10.1088/1757-899X/869/5/052002.

21. Churin, P. Methods of increasing the accuracy of the simulation of wind effects based on preliminary statistical analysis of the frequency of occurrence of different wind forces in the directions / P. Churin, O. Poddaeva, A. Fedosova, O. Egorychev // *7th European and African Conference on Wind Engineering, EACWE 2017*: сб. статей. – 2017.

22. Dunichkin, I. Studies and evaluation of bioclimatic comfort of residential areas for improving the quality of environment // I. Dunichkin, O. Poddaeva, K. Golokhvast // *Building Simulation*. – 2019. – T. 12(2). – C. 177-182.

23. Gribach, J. Research methods of bioclimatic comfort at the residential area / J. Gribach, O. Poddaeva, P. Churin // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – T. 91. – C. 05022.

24. Loktev, A. An Experimental Study of the Effects of Wind on a Metal Bridge Crossing with Two Independent Parallel Spans / A. Loktev, O. Poddaeva, A. Fedosova, V. Korolev // *Nonlinearity. Problems, Solutions and Applications. Theoretical and Applied Mathematics*. – 2017. – T. 1. – C. 291-307.

25. Loktev, A. Mathematical modeling of antenna-mast structures with aerodynamic effects / A. Loktev, V. Korolev, O. Poddaeva, I. Chernikov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – T. 463(3). - C. 032018.

26. Loktev, A. Modeling the dynamic behavior of the upper structure of the railway track / A. Loktev, V. Korolev, I. Shishkina, D. Basovsky // *Procedia Engineering*. – 2017. – T. 189. – C. 133-137.

27. Pomelov, V. Analysis of domestic and foreign regulatory and scientific and technical documents in the field of wind influence on buildings and structures that are part of hazardous production facilities / V. Pomelov, O. Poddaeva, P. Churin, A. Fedosova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – T. 365(5). – C. 052025.

28. Poddaeva, O. Aerodynamic stability of bridges with various levels of structural damping / O. Poddaeva, P. Churin // *Architecture and Engineering*. – 2021. – T. 6.4. – C. 54-62.

29. Poddaeva, O. Conducting calculating and experimental researches of the bioclimatic comfort of the residential area territory / O. Poddaeva, I. Dunichkin, J. Gribach // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – T. 365(2). – C. 022029.
30. Poddaeva, O. Conducting experimental investigations of wind influence on high-rise constructions. / O. Poddaeva, A. Fedosova, P. Churin, J. Gribach // E3S Web of Conferences. – 2018. – T. 33.
31. Poddaeva, O. Damping capacity of materials and its effect on the dynamic behavior of structures. Review / O. Poddaeva, A. Fedosova // Energy Reports. – 2021. – T. 7. – C. 299-307.
32. Poddaeva, O. Determination of hazardous areas at bridge crossings under wind impacts / O. Poddaeva, A. Loktev, A. Zavyalov, E. Sorokina // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – T. 402. – C. 1026-1034.
33. Poddaeva, O. Extreme wind speeds analysis using extended wind rose based on statistic methods / O. Poddaeva, A. Fedosova // Energy Reports. – 2022. – T. 8. – C. 1177-1184.
34. Poddaeva, O. Experimental modeling of snow action on unique construction facilities / O. Poddaeva // Architecture and Engineering. – 2021. – T. 6(2). – C. 45-51.
35. Poddaeva, O. Experimental studies of the gravity-type foundation windage in a wind tunnel / O. Poddaeva, P. Churin, J. Gribach // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – C. 855-863.
36. Poddaeva, O. Improving the comfort of pedestrian and recreational areas of the stylobate part of the residential complex / O. Poddaeva, P. Churin // Energy Reports. – 2021. – T. 7. – C. 395-402.
37. Poddaeva, O. Investigation of the influence of various factors on the results of a calculation-experimental assessment of frequencies and amplitudes during vortex excitation of bending vibrations of building structures / O. Poddaeva, N. Ageev, A. Fedosova // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – C. 1425(1).
38. Poddaeva, O. Investigation of the stability of a two-span bridge with the use of a high-precision laser displacement sensors / O. Poddaeva, P. Churin, A. Fedosova, S.

Truhanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Т. 317(1). – С. 012020.

39. Poddaeva, O. Measures of improving the accuracy of the calculation of energy efficiency and energy saving of construction transport infrastructure / O. Poddaeva, A. Kubenin, D. Gribach, // Advances in Intelligent Systems and Computing . – 2018. – С. 490 – 497.

40. Poddaeva, O. Numerical simulation of the pedestrian comfort of the microdistrict / O. Poddaeva, P. Churin // Energy Reports. – 2022. – Т. 8. – С. 1491-1500.

41. Poddaeva, O. Safety requirements for snow load on unique transport infrastructure facilities / O. Poddaeva // Architecture and Engineering. – 2022. – Т. 7(2). – С. 79-85.

42. Poddaeva, O. Stability and reliability of long-span bridge structures / O. Poddaeva, P. Churin, A. Loktev, C. Salame // Architecture and Engineering. – 2022. – Т. 7(3). – С. 65-75.

43. Poddaeva, O. The influence of the structural vibrations' logarithmic decrement on its stability in the event of vortex excitation / O. Poddaeva, A. Fedosova, P. Churin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Т. 913(4). - С. 042069.

44. Poddaeva, O. The study of wind effects on the bridge constructions / O. Poddaeva, A. Fedosova, J. Gribach // E3S Web of Conferences. – 2019. – Т. 97. – С.03030.

в) в других изданиях и материалах конференций

45. Поддаева, О.И. Experimental studies of counter vortex flows modeling / О.И. Поддаева, П.С. Чури́н, Г.В. Орехов, С.А. Капустин // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Т. 756. – С. 331-335.

46. Поддаева, О.И. The study of wind loads on buildings and structures of increased degree of responsibility / О.И. Поддаева, П.С. Чури́н, В.Ю. Помелов // Procedia Engineering. – 2016. – Т. 153. – С. 550-555.

47. Поддаева, О.И. Experimental study of wind loads on unique buildings and structures in Russia / О.И. Поддаева, П.С. Чури́н, И.В. Дуничкин // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Т. 86. – С. 02012.

48. Поддаева, О.И. Исследование пролетного строения на аэродинамическую неустойчивость в виде дивергенции с применением численного моделирования / О.И. Поддаева, А.Н. Федосова // Новая наука: опыт, традиции, инновации. – 2016. – С. 167-172.
49. Поддаева, О.И. Оценка возможности возникновения эффекта галопирования пролетного строения с применением численного моделирования / О.И. Поддаева, А.Н. Федосова // Новая наука: опыт, традиции, инновации. – 2016. – С. 78-83.
50. Поддаева, О.И. Повышение точности численного моделирования аэродинамики пролетных строений с помощью применения предварительной методики анализа ветровых воздействий / О.И. Поддаева, А.Н. Федосова, П.С. Чурин // Новая наука: проблемы и перспективы. – 2016. – С. 182-186.
51. Поддаева, О.И. Experimental and computational studies of wind loads on the airport complex / О.И. Поддаева, П.С. Чурин // 4th International Conference on Advanced Materials and Information Technology Processing (AMITP 2016) – 2016. – С. 237-241.
52. Поддаева, О.И. Methodology of numerical and experimental research of wind effects on high-rise complex / О.И. Поддаева, Ю.С. Грибач // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Т. 117. – С. 00137.
53. Поддаева, О.И. Experimental studies of wind impact on coke chambers / О.И. Поддаева, П.С. Чурин, В.Ю. Помелов // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Т. 251. – С. 02034.
54. Поддаева, О.И. On the experience of constructing a vented under-floor space with heat-insulated fences under the buildings of the lightweight steel-framed constructions on permafrost soils / О.И. Поддаева, А.А. Локтев, В.В. Королев [и др.] // - IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Т. 463. – С. 032018.
55. Поддаева, О.И. Расчетные исследования ветрового воздействия на высотные здания / О.И. Поддаева, П.С. Чурин, Ю.С. Грибач // Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы – 2019 Сборник

материалов Всероссийской научно-практической конференции: сб. статей, 2019. – С. 419-423.

56. Поддаева, О.И. Экспериментальное исследование ветрового воздействия на высотный жилой комплекс с радиальной компоновкой / О.И. Поддаева, П.С. Чурин // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования. Сборник докладов Первой Национальной конференции : сб. статей. – Москва, 2020. – С. 767-770.

57. Поддаева, О.И. Исследование ветрового воздействия на железнодорожный мост высокоскоростной магистрали / О.И. Поддаева, Ю.С. Грибач // Железная дорога: путь в будущее: сб. статей, 2022. – С. 31-35.

Поддаева Ольга Игоревна

**ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ В ПРЕДЕЛАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА**

2.9.10. Техносферная безопасность транспортных систем
(технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук

Подписано в печать . .2023

Формат 60x84/16 Заказ №

Объем 1,5 усл. п. л. Тираж 100 экз.

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