

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

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
(технические науки)

Диссертация на соискание учёной степени
доктора технических наук

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

Москва 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫЕ ОБЪЕКТЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ	20
1.1. ВВЕДЕНИЕ.....	20
1.2. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЪЕКТЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ.....	21
1.2.1. Аварии на объектах транспортной инфраструктуры	21
1.2.2. Анализ нормативной, нормативно-технической и научной литературы, посвященной исследованию климатических воздействий на объекты транспортной инфраструктуры	32
1.2.2.1. Ветровые воздействия	32
1.2.2.2. Снеговые воздействия	52
1.2.2.3. Влияние наледи на конструкциях	61
1.3. ОБЗОР ТРЕБОВАНИЙ К ПРОВЕДЕНИЮ ФИЗИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СООРУЖЕНИЙ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ	66
1.4. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОСФЕРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫЕ ОБЪЕКТЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ	79
1.5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 1	81
2. МЕТОДИКА ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЪЕКТЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ.....	83

2.1. МЕТОДИКА АНАЛИЗА КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ОСНОВАННАЯ НА СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДАХ	83
2.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЪЕКТЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ.....	87
2.2.1. Большепролетные мосты	87
Подготовка к проведению испытаний по исследованию интегральных ветровых нагрузок.....	88
Проведение испытаний.....	89
Обработка результатов	90
Подготовка к проведению испытаний по исследованию параметров вынужденных колебаний.....	90
Проведение испытаний.....	92
Обработка результатов	93
2.2.2. Вокзалы, аэропорты, канатные дороги, ТПУ и др	94
Алгоритм проведения испытаний по определению распределения аэродинамического коэффициента внешнего давления c_e по поверхности исследуемого объекта	96
2.2.3. Мачты освещения, конструкции электрического хозяйства транспортной инфраструктуры и другие решетчатые (ветропроницаемые сооружения) 100	
Алгоритм проведения испытаний по определению интегральных аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления c_x , поперечной силы c_y и крутящего момента m_z	101
2.2.4. Методика оценки возможности возникновения резонансного вихревого возбуждения на объектах транспортной инфраструктуры	104
2.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЕГОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЪЕКТЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ.....	106

2.3.1. Обоснование	106
2.3.2. Методика моделирования снегоотложений	108
2.4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 2	109
3. 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.....	111
3.1. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	111
3.1.1. Апробация методики анализа экстремальных ветровых воздействий	111
3.1.2. Апробация методики анализа снеговых воздействий.....	114
3.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ ЛАНДШАФТНОГО ТИПА НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И МОНТАЖА	117
3.2.1. Разработка экспериментальных моделей мостовых конструкций разных типов для проведения динамических исследований.....	118
Исследование аэродинамической устойчивости пролетного строения в условиях плотной городской застройки. Оценка влияния существующего путепровода на проектируемый (Модель 1)	118
Исследование аэродинамической устойчивости моста с двумя параллельными пролетными строениями, расположенными в непосредственной близости друг от друга. Оценка возможности возникновения бафтинга (Модель 2)	123
Исследование влияния орографии и угла скольжения на аэродинамическую устойчивость пролетного строения (Модель 3).....	127

3.2.2. Результаты экспериментальных исследований	132
Исследование аэродинамической устойчивости пролетного строения в условиях плотной городской застройки. Оценка влияния существующего путепровода на проектируемый (Модель 1)	132
Исследование аэродинамической устойчивости моста с двумя параллельными пролетными строениями, расположенными в непосредственной близости друг от друга. Оценка возможности возникновения бафтинга (Модель 2)	138
Исследование влияния топографии и угла скольжения на аэродинамическую устойчивость пролетного строения (Модель 3).....	142
3.2.3. Экспериментальные исследования мостового перехода на стадии монтажа (стадия максимальной надвижки).....	146
3.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ВЕТРОВЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ	149
3.3.1. Апробация методики моделирования ветровых воздействий на объект транспортной инфраструктуры – аэровокзальный комплекс	149
Постановка задачи	149
Проектирование и изготовление модели объекта транспортной инфраструктуры	150
Проведение экспериментальных исследований и результаты	151
3.3.2. Апробация методики моделирования ветровых воздействий на решетчатую конструкцию	155
3.3.3. Апробация методики исследования на резонансное вихревое возбуждение	157

3.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА СНЕГОВЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ	160
3.4.1. Апробация методики моделирования снеговых воздействий на уникальном объекте транспортной инфраструктуры.....	160
Постановка задачи	160
Проектирование и изготовление макета конструкции.....	161
Проведение экспериментальных исследований закономерностей снегопереноса и снегоотложений на кровельном покрытии исследуемого объекта.....	161
Результаты фотофиксации картин распределения снегоотложений	162
Схемы снеговых отложений на поверхности кровли исследуемого объекта.....	163
3.4.2. Апробация методики моделирования снеговых воздействий на объекте транспортной инфраструктуры – аэровокзальном комплексе.....	165
3.5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 3	170
4. ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД ВЕРИФИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ	172
4.1. ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО МОСТОВОГО СООРУЖЕНИЯ	172
4.1.1. Оценка возможности возникновения вихревого возбуждения и определение его параметров	172
4.1.2. Оценка возможности возникновения изгибно-крутильного флаттера	175

4.2. ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СНЕГОПЕРЕНОСА	183
4.2.1. Верификация методики моделирования снегопереноса на классическом примитиве (здание с плоской кровлей прямоугольное в плане) 184	
4.2.2. Верификация методики моделирования снегопереноса на реальном сооружении с висячим кровельным покрытием	194
4.3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 4	202
5. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ, И САМИ СООРУЖЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СЛУЖБЫ	204
5.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЫЛЕВЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ.....	204
5.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ ЛАНДШАФТНОГО ТИПА.....	209
5.2.1. Исследование различных типов шумозащитных экранов в аэродинамической трубе ландшафтного типа	209
5.2.2. Исследование влияния проницаемости шумозащитных экранов на аэродинамическую устойчивость пролетного строения	212
5.3. ВОЗНИКНОВЕНИЕ НАЛЕДИ И СОПУТСТВУЮЩИЕ РИСКИ 226	
5.4. ВЫЯВЛЕНИЕ ОПАСНЫХ ЗОН ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ .	233
5.5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 5	237
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	238
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	242

ВВЕДЕНИЕ

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 повышения 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 методику 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 д.р.) 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.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации подтверждается корректной постановкой решаемых задач; использованием традиционных и современных верифицированных методик и подходов в области моделирования динамических воздействий на объекты транспортной инфраструктуры; проверкой адекватности предложенных математических моделей и вычислительных алгоритмов; подтверждением теоретических результатов при сравнении с результатами натурного мониторинга и физического моделирования; соответствием полученных аналитических и графических зависимостей с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов,

использованием поверенных измерительных систем и систем мониторинга с проверкой сходимости результатов отдельных этапов моделирования.

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 объекты 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 объекты транспортной инфраструктуры, в анализе подходов и методов оценки ветровых и сопутствующих

воздействий на критически важные объекты 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.

1. АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫЕ ОБЪЕКТЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

1.1. ВВЕДЕНИЕ

Транспорт – важная составная часть экономики России, так как является материальным носителем между районами, отраслями, предприятиями. Специализация районов, их комплексное развитие невозможны без системы транспорта. Транспортный фактор оказывает влияние на размещение производства, без его учета нельзя достичь рационального размещения производительных сил [6].

Объекты транспортной инфраструктуры включают в себя железнодорожные, трамвайные и внутренние водные пути, контактные линии, автомобильные дороги, тоннели, эстакады, мосты, вокзалы, железнодорожные и автобусные станции, метрополитены, аэродромы и аэропорты, объекты систем связи, навигации и управления движением транспортных средств, а также иные обеспечивающие функционирование транспортного комплекса здания, сооружения, устройства и оборудование [5].

К сожалению, аварии и разрушения транспортных сооружений являются обычным явлением, о чем говорят, например, результаты анализа, проведенные авторами работ [93], [24], [28], [29], [41], [76], [117].

В соответствии с Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р) [95] климатическая уязвимость транспортной инфраструктуры РФ отнесена к проблемам и ключевым инфраструктурным вызовам транспортного комплекса, а адаптация транспортной инфраструктуры к физическим климатическим рискам включена в направления развития транспортного комплекса Российской Федерации. Одной из задач развития транспортного комплекса Российской Федерации является приведение

транспортной инфраструктуры в соответствии с нормативными требованиями и обеспечение ее долговременной устойчивости, включая обеспечение ее защищенности от воздействия изменений климата.

1.2. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЪЕКТЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

1.2.1. Аварии на объектах транспортной инфраструктуры

Мостовые конструкции являются одними из ключевых объектов транспортной инфраструктуры, однако по количеству аварий и катастроф занимают лидирующее место.

Появление новых материалов, современных технологий строительства приводит к увеличению пролетов мостовых конструкции, что очевидно, требует более тщательного подхода к их проектированию.

На сегодняшний день в истории строительства мостов известны десятки случаев крушений мостов: крушение моста у г. Аштабьюла (США, 1876 г) привело к гибели 92 пассажиров поезда; Тейский мост (Англия, 1879 г, обрушение 13 пролетов моста) (Рисунок 1.1); мост через р.Кевду (1875, Россия); Менхенштейнский мост (1891, Швейцария, убито и ранено около 200 чел), Корнуэльский мост (Канада, 1898); мост близ г. Мидвил (1902, США); Мюнхенский мост (1904, Германия); мост в Сент-Пол (1904, США); мост в г. Чарлстон (1904, США); мост через реку Луару (1907, Франция, гибель 27 человек); Квебекский мост (1907, Канада, крушение произошло за 15 минут до конца рабочего дня, находившиеся на мосту 74 человека погибли); мост через реку Иллинойс (1908, США); мост на Алтае (1917, Россия); вторичное крушение Квебекского моста (1916); Мозырский мост (1925, СССР); Ниагарский арочный мост (1938, США, в 1868 г на этом месте был построен узкий висячий мост, в 1888

этот мост заменили другим, а в 1889 г ветер вырвал один из заанкеренных ветровых тросов и обрушил проезжую часть. В 1938 г данный мост был разрушен затором льда); сварной мост близ г. Хассельт (1938, Бельгия); Такомакский мост пролетом 854 м (Рисунок 1.2) (1940, США, крушение данного моста произвело огромное впечатление на весь инженерно-технический мир. Крушение наглядно показало, что сооружение, способное сопротивляться статическим силам, может оказаться неустойчивым под влиянием динамической нагрузки) и ряд других.



Рисунок 1.1– Крушение железнодорожного моста через Ферг-оф-Тей

К сожалению, обрушения мостов происходят по всему миру и в новой истории. 2 января 2008 года произошло обрушение строящегося путепровода в Приуральском районе на км 72 трассы Обская – Бованенко на полуострове Ямал (Ямало-ненецкий автономный округ). При обрушении пролет упал на стоящий под путепроводом грузоподъемный кран, в результате погиб крановщик [47].

24 декабря 2008 года произошел обрыв двух вант недавно построенного автодорожного моста на въезде в г. Иерусалим в Израиле. Одной из причин инцидента явились сильные порывы ветра [47].



Рисунок 1.2 – Крушение Такомоского моста

20 мая 2010 года было перекрыто движение по Волгоградскому автодорожному мосту (первой очереди), входящему в комплекс автодорожных сооружений мостового перехода через р. Волга в г. Волгограде, из-за сильного раскачивания конструкции. В связи с происшествием, мост получил неофициальное название «танцующий» [47]. Причины происшествия с Волгоградским мостом рассмотрены в работах [63], [64], [83], [206].

В 2020 году в Мурманской области рухнул железнодорожный мост (www.interfax.ru) (Рисунок 1.3)



Рисунок 1.3 – Обрушение железнодорожного моста в Мурманской области

В 2021 году в китайской провинции Хубэй произошло обрушении эстакады моста (www.vesti.ru) (Рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Обрушение эстакады моста (Китай)

Обрушение пешеходного моста длиной 230 м в Морви на реке Мачху в западном индийском штате Гуджарат произошло 30 октября 2022 года (Рисунок 1.5). В момент обрушения на мосту было порядка 500 человек, более 135 человек погибли. Десятки человек получили тяжёлые ранения, некоторые числятся пропавшими без вести (ria.ru).



Рисунок 1.5 – Обрушение моста в Индии

Также широко распространены случаи антропогенной неустойчивости мостов, одним из самых известных случаев потери устойчивости моста, вызванными пешеходами, является мост Миллениум в Лондоне в 2000 году ([127], [208]).

Аварии и катастрофы продолжают происходить по всему миру не только с мостовыми конструкциями, но и с другими объектами транспортной инфраструктуры.

Так, 23 мая 2004 года огромный кусок терминала 2Е обрушился в аэропорту Шарль-де-Голля (Рисунок 1.6). В результате в самом загруженном аэропорту Франции погибло несколько человек (<https://www.thoughtco.com/>).



Рисунок 1.6 – Обрушение терминала аэропорта (Франция)

В 2011 торнадо частично обрушил аэропорт в США (www.rbc.ru) (Рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Обрушение одного из терминалов аэропорта (США)

В 2015 году в Китае обрушилась строящаяся станция метро (Рисунок 1.8) (НТВ).



Рисунок 1.8 – Обрушение строящейся станции метро (Китай)

8 августа 2017 года произошло обрушение ротонды здания речного вокзала, являвшегося памятником архитектуры регионального значения (ТАСС) (Рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Обрушение здания речного вокзала в Твери

В том же 2017 году металлический перронный навес обрушился на железнодорожном вокзале в Казахстане, при обрушении был задет вагон пассажирского поезда, возможной причиной являются ветровые или снеговые воздействия /ru.sputnik.kz/ (Рисунок 1.10).



Рисунок 1.10– Обрушение навеса на железнодорожном вокзале (Казахстан)

В 2018 году порыв ветра привел к частичному обрушению крыши аэропорта в Китае (vesti.ru) (Рисунок 1.11).

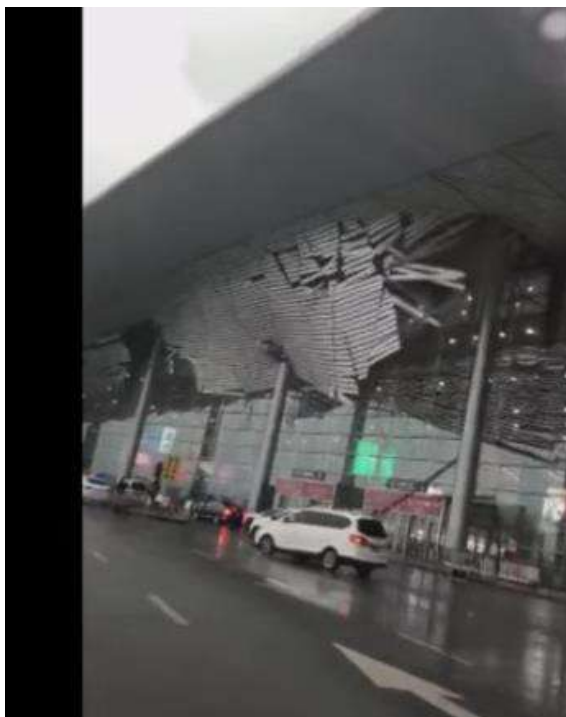


Рисунок 1.11 – Обрушение крыши в аэропорту (Китай)

В 2019 году в аэропорту Шереметьево обрушилась крыша одного из ангаров (ТАСС).

В 2020 году Железнодорожный вокзал обрушился на востоке Индии в городе Бурдван (НТВ) (Рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 – Обрушение вокзала (Индия)

В 2022 году в Бангкоке рухнула крыша международного аэропорта (kinsite.ru) (Рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Обрушение кровли (Тайланд)

В 2022 году в Саратовской области под тяжестью снега обрушилась крыша бывшего локомотивного депо на железнодорожной станции Аткарск /www.vzsar.ru/ (Рисунок 1.14)



Рисунок 1.14 – Обрушение кровли локомотивного депо на железнодорожной станции (Россия)

В том же году в Турции из-за большого скопления снега обрушилась крыша грузового терминала, который используется авиакомпанией Turkish Airlines, в аэропорту Стамбула / news.day.az / (Рисунок 1.15).



Рисунок 1.15– Обрушение кровли терминала в аэропорту (Турция)

Катастрофы последних лет подтверждают выводы авторов работ [47], [48], [60], [61], сделанные еще в 2017 году: «аварии и разрушения транспортных сооружений происходили в прошлое время, имеют место в настоящее время и скорее всего, будут происходить в будущем; аварии и разрушения транспортных сооружений происходят во всех уголках земного шара, во всех странах, независимо от их экономического состояния; при этом наличие большого количества транспортных сооружений может являться причиной большего количества их аварий и разрушений».

Работа [24] является одной из первых попыток анализа крушений конструкций. В работе проанализировано более двух десятков крушений мостов по всему миру. Автор выделяет следующие категории причин аварий:

- 1) потери устойчивости;
- 2) дефекты основания;
- 3) неудовлетворительное производство работ.

В работе [81] выделены три группы причин аварий мостов:

- 1) катастрофические природные воздействия (около 60 %);
- 2) ошибки проектирования и дефекты строительства (примерно 30 %);
- 3) неудовлетворительная эксплуатация и перегрузка (до 10 %).

Аварии на мостах и их причины изучаются не только отечественными, но и зарубежными авторами. В работе [153] причины крушений мостов разделены на две большие группы: природные (наводнения, землетрясения, ветер и тд), техногенные (ошибки в проектировании, отсутствие технического обслуживания и пр.). В статье [129] приведен обзор основных причин и механизмов обрушения мостов.

Из работ отечественных и зарубежных авторов следует, что ветер и недоучет ветровых воздействий являются одной из причин аварий и катастроф мостовых сооружений. В цикле работ [47], [48], [60], [61], являющимся на сегодняшний день одним наиболее полных анализов аварий мостовых сооружений и их причин, недоучет ветровой нагрузки и аэродинамическая неустойчивостью выделены в отдельную группу причин катастроф, произошедших с мостовыми конструкциями.

1.2.2. Анализ нормативной, нормативно-технической и научной литературы, посвященной исследованию климатических воздействий на объекты транспортной инфраструктуры

1.2.2.1. Ветровые воздействия

Динамическая природа ветрового воздействия начала рассматриваться инженерами в рамках расчета и проектирования строительных конструкций в конце XIX, начале XX века. Стимулом для более подробной оценки ветровых воздействий послужили наблюдения при строительстве и эксплуатации мостовых конструкций. Появилось понимание, что не всегда допустимо упрощать ветровой поток до статического воздействия.

В 1887 году Томас Клэктон Фидлер опубликовал доклад о ветровых воздействиях на мосты [140], где отметил, что правильная оценка ветрового воздействия также важна, как и оценка эксплуатационных нагрузок. В данной работе приведено четкое разделение воздействия ветра на статическую составляющую (рассчитанную на основании максимальной скорости ветра) и динамическую составляющую (динамические эффекты порывов ветра).

В 1910 году Александр Густав Эйфель опубликовал книгу «Сопротивление ветру», в которой, помимо результатов своих исследований, он обобщил знания своего времени. Он заметил, что сопротивление ветра, которое к тому времени было важной проблемой для авиации, становилось все более важным в различных отраслях гражданского строительства, особенно для крупных металлических конструкций [36].

Существенный вклад в развитие современной аэродинамики внесли Якоб Питер Ден Гартог, изучивший явления характерные для авиационной техники (галопирование, флаттер) применительно к конструкциям подвесных мостов [128], и Теодор фон Карман, существенно расширивший представления о ветровом воздействии на строительные конструкции и доказавший необходимость

испытания строительных конструкций сложной формы в аэродинамических трубах. Переходя к динамическим задачам, Карман утверждал, что в большинстве высотных зданий, башен, линий электропередачи, дымоходов и подвесных мостов колебания играют существенную роль. Карман определил резонанс как совпадение собственной частоты механической системы и внешней периодической силы. Он заметил, что резонанс, вызванный аэродинамическими воздействиями, не совсем соответствует этому определению: скорость ветра переменная по интенсивности и направлению, поэтому ему не хватает «собственной периодичности». Ситуация меняется, когда тело генерирует альтернативную турбулентность, вихревой след Кармана, организованный в периодический поток, которому при определенном значении скорости ветра соответствует резонансная частота.

В 1958 году Фаркухарсон окончательно классифицировал явления аэродинамической неустойчивости: вихревой резонанс, представляющий собой синхронизацию колебаний из-за образования вихрей в следе за конструкцией, особенно опасный для дымоходов, подвесных труб, линий электропередачи, большепролетных мостов; отрицательный наклон коэффициента подъемной силы и момента и связанное с ним явление галопирования, влияющее на покрытые льдом линии электропередачи и большепролетные мосты; и флаттер, влияющий на плоские конструкции, такие как мосты, большие консольные крыши, знаки и рекламные щиты, а также на элементы, слабо соединенные на этапе монтажа.

Современное представление о характере ветрового воздействия на строительные конструкции хорошо иллюстрировано в работах М.И. Казакевича. В своих работах указанный исследователь перечисляет основные параметры ветрового потока, необходимые для изучения реакции строительных конструкций: скорость и направление ветра, степень его турбулентности, повторяемость этих параметров, а также сопутствующие ветру атмосферные осадки [36].

Расчетная скорость ветра характеризует статическое ветровое воздействие на конструкцию и зависит прежде всего от особенности рельефа местности и высоты над поверхностью земли.

С точки зрения динамического воздействия, наиболее интересным параметром является степень турбулентности ветрового потока. Основной частотой пульсации ветра в приземном слое атмосферы является частота $f = 0,02$ Гц. При данной частоте турбулентный ветровой поток обладает наибольшей энергией.

По статистическим данным число аварий зданий и сооружений вследствие превышения климатических нагрузок, в том числе на большепролетные покрытия не уменьшается. Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 N 384-ФЗ, ГОСТ 27751 «Надежность строительных конструкции» с целью обеспечения безопасности зданий и сооружений необходимо определение достоверных данных о ветровых и снеговых нагрузках, особенно для зданий и сооружений повышенного уровня ответственности (здания и сооружения особо опасных и технически сложных или уникальных объектов; все сооружения, при проектировании и строительстве которых используются принципиально новые конструктивные решения и технологии, которые не прошли проверку в практике строительства и эксплуатации; объекты жизнеобеспечения городов и населенных пунктов; тоннели, трубопроводы на дорогах высшей категории или имеющие протяженность более 500 м; строительные объекты высотой более 100 метров; пролетные строения мостов с пролетом более 200 метров; большепролетные покрытия строительных объектов с пролетом более 100 метров; строительные объекты с консольными конструкциями более 20 метров; строительные объекты с заглублением подземной части более чем на 15 метров).

Основным документов по части назначения ветровых нагрузок является СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», где в приложениях Ж и И приведены требования к моделированию в аэродинамических трубах. Так же требования к физическому моделированию ветровых воздействий в аэродинамических трубах приведены ГОСТ Р 56728-2015 «Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции» [20]. ГОСТ Р 56728-2015 не

входит в перечень документов области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечиваются требования ФЗ.

Широко известны случаи потери устойчивости гибких сооружений в ветровом потоке: авария моста Такома-Нэрроуз (полное разрушение центрального пролёта длиной 854 м), колебания Волгоградского моста (амплитуда колебаний по разным оценкам составила от 30 до 100 см), обрушение виадука в Генуе (ветровое воздействие считается одной из возможных причин). Явления аэродинамической неустойчивости все чаще фиксируются на металлических балочных пролетных строениях (виадук Tozaki, мост Trans Tokyo Bay Highway bridge, мостовой переход к аэропорту Kansai, пролеты – подходы к мосту Oshima, мост Rio-Niteroi, пролеты – подходы к Восточному мосту Большой Бельт и др.), хотя исторически считалось, что наиболее восприимчивыми к динамическому воздействию ветрового потока являются вантовые и подвесные конструкции с более протяженными пролетами [41], [61].

Возникающие потери устойчивости мостовых конструкции вплоть до разрушения показывают, что для мостовых конструкций проверка аэродинамической устойчивости является одним из ключевых этапов при их проектировании.

Процедура исследования ветровых воздействий на мостовые сооружения на территории РФ регламентируется ГОСТ Р 59625— 2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Правила расчета и подтверждения аэроупругой устойчивости» [19].

Учет ветрового воздействия согласно п. 5.1 [19] должен отражать многообразие воздействия ветра на сооружения в целом и отдельные элементы конструкций, включая:

- статическое действие ветрового потока;
- динамическое действие ветрового потока, обусловленное пульсациями ветра, одиночными порывами и грозowymi фронтами;
- аэроупругое взаимодействие ветрового потока с конструкциями пролетного строения.

Оценка статического и динамического действия ветра на конструкции согласно [19] должна быть выполнена по ГОСТ 33390 [18], СП 20.13330.2016 [90], СП 35.13330.2011 [91].

ГОСТ 33390 [18] предписывает производить расчет мостовых сооружений на действие ветра отдельно при строительстве и эксплуатации, ветровая нагрузка отнесена к прочим временным нагрузками.

СП 20.13330.2016 [90] содержит методику для определения нормативного значения основной ветровой нагрузки на здания и сооружения. Однако согласно п. 11.1.7 «для сооружений повышенного уровня ответственности, а также во всех случаях, не предусмотренных приложением В.1 (иные формы сооружений, учет других направлений ветрового потока или учет составляющих общего сопротивления тела по другим направлениям, необходимость учета влияния близстоящих зданий и сооружений, рельефа местности и т.п.), аэродинамические коэффициенты устанавливаются с учетом опыта нормирования воздействия ветра на основе результатов модельных испытаний сооружений в аэродинамических трубах (см. приложения Ж и И) или опубликованных данных».

П. 11.2 нормативного документа [90] позволяет определять значения пиковой ветровой нагрузки на отдельно стоящие прямоугольные в плане здания, во всех остальных случаях аэродинамические коэффициенты должны быть определены на основе результатов модельных испытаний в аэродинамических трубах или с учетом опубликованных данных.

Приложение Ж [90] содержит основные требования к проведению модельных испытаний зданий и сооружений в аэродинамических трубах, а приложение И – общую методику проведения модельных испытаний зданий и сооружений в аэродинамических трубах, которая предписывает обеспечивать геометрическое подобие, а также проводить испытания в зоне автомодельности по числу Рейнольдса. Четкая последовательность действий при проведении аэродинамических испытаний в [90] не приводится.

Пункты 5.48 и 6.24 СП 35.13330.2011 [91] гласят, что «висячие и вантовые мосты, а также стальные балочные мосты с пролетами более 100 м следует

проверять на аэродинамическую устойчивость и пространственную жесткость. Для конструкций с динамическими характеристиками, существенно отличающимися от аналогичных характеристик построенных мостов, кроме аналитических расчетов следует проводить соответствующие исследования на моделях или путем математического моделирования», а «для вантовых и висячих мостов, а также стальных балочных мостов согласно 5.48 следует проводить проверку на аэродинамическую устойчивость и на резонанс колебаний в направлении, перпендикулярном ветровому потоку. При проверке аэродинамической устойчивости должна определяться критическая скорость ветра, при которой вследствие взаимодействия воздушного потока с сооружением возможно появление флаттера (возникновение опасных изгибно-крутильных колебаний балки жесткости). Критическая скорость, отвечающая возникновению флаттера, найденная по результатам аэродинамических испытаний моделей или определенная расчетом, должна быть больше максимальной скорости ветра, возможного в районе расположения моста, не менее чем в 1,5 раза» .

П. 5.3 [19] содержит классификацию явлений аэроупругой неустойчивости, которые необходимо учитывать при проектировании мостовых сооружений (Рисунок 1.16).



Рисунок 1.16 – Явления аэроупругой неустойчивости

Похожую и более подробную классификацию явлений аэроупругой неустойчивости приводит М.И. Казакевич [36] (Рисунок 1.17).



Рисунок 1.17– Явления аэроупругой неустойчивости. Классификация Казакевича М.И.

Проверка на аэроупругую устойчивость согласно [19] должна быть выполнена для вантовых и висячих мостов; для стальных балочных со сплошной стенкой, рамных, арочных и экстрадозных мостов при периоде собственных поперечных изгибных колебаний в вертикальной плоскости по первой форме указанных типов мостовых сооружений более 1,5 с; - на стадии монтажа ПС для консолей, образующихся при навесной сборке или продольной надвижке, имеющих на значительной части длины сечение со сплошными стенками, при периоде собственных поперечных колебаний в вертикальной или горизонтальной плоскости более 3 с или периоде крутильных колебаний более 2 с, а для ПС, имеющих в поперечном сечении две и более балки и участок с демонтированными консольными и межбалочными плитами — при периоде более 3 — L_y/L_k с, при этом длина аванбека с переменной и/или перфорированной стенкой не учитывается в составе L_y ; - для отдельных элементов решетчатых конструкций и подвесок арочных мостов с гибкостью λ более 100.

В случае вантовых, висячих мостов арочных с гибкими подвесками и экстрадозных мостов (п. 5.5 [19]) должно быть проведено исследование на все явления, приведенные на Рисунок 1.16.

В случае балочных (включая консоли на монтаже) и рамных мостов должно быть проведено исследование на вихревое возбуждение (методика приведена в п.8 [19]).

Вихревое возбуждение – интенсивное нарастание амплитуд аэроупругих автоколебаний элементов мостовых конструкций поперек потока, наблюдаемое при совпадении частоты их колебаний с частотой срыва вихрей Кармана и с одной из собственных частот [36], [66].

Суть методики [19] в определении критической скорости вихревого возбуждения

$$V_{\text{ВВ}} = \frac{fH}{Sh} \quad (1.1)$$

где f — собственная частота, изгибных или крутильных колебаний ПС, или его элемента в поперечном ветровому потоку направлении, Гц; H — характерная высота поперечного сечения элемента поперек ветрового потока, принимаемая в соответствии с приложением А, м; Sh — число Струхалия.

Если данные эксперимента отсутствуют п.8 [19] содержит эмпирический график для определения числа Струхалия в зависимости от отношения ширины сечения к характерной высоте сечения ПС (Рисунок 1.18).

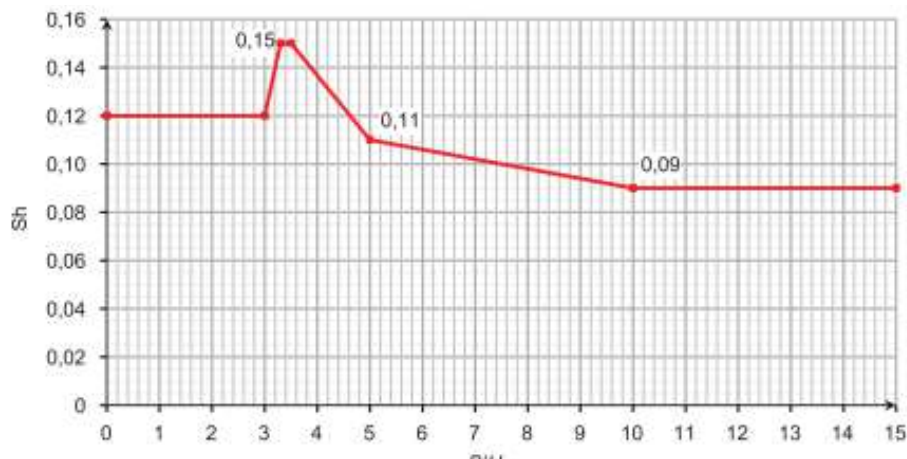


Рисунок 1.18— Зависимость числа Струхалия от В/Н

Следует отметить, что в работе [36] график зависимости числа Струхалия от отношения ширины сечения к характерной высоте сечения ПС выглядит следующим образом (Рисунок 1.19), что лучше соответствует физическим основам

теории обтекания и находит отражение во всех мировых нормах, в т.ч. в Стандартах последнего поколения: EUROCODE 1991-1-4: 2009 [136]; Стандарт Италии CNR-DT297/2008 [147].

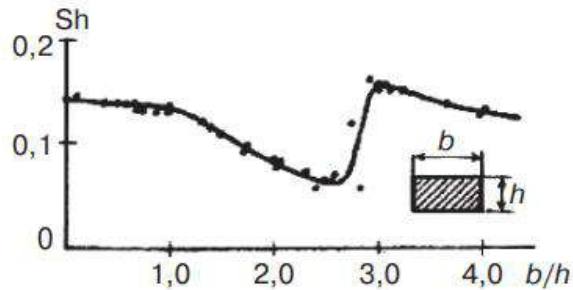


Рисунок 1.19— График зависимости числа Струхала от отношения размеров поперечного сечения конструкции [36]

Устойчивость на вихревое возбуждения по [19] считается обеспеченной, если

$$V_{\text{ВВ}} > 1,25V_{\text{расч}}, \quad (1.2)$$

где $V_{\text{ВВ}}$ – критическая скорость вихревого возбуждения, $V_{\text{расч}}$ – расчетное значение скорости ветрового потока в уровне конструкции в заданном районе строительства мостового перехода.

П. 5.6. [19] также предписывает для балочных (включая консоли на монтаже) и рамных мостов проверку на бафтинг, методика проверки на бафтинг приведена в п. 12 [18].

Бафтинг относится к одному из наименее изученных явлений аэроупругой неустойчивости и наблюдается у элементов конструкций в турбулентном потоке или в следе за другими элементами из-за интерференции аэродинамических сил различной природы [36].

Бафтинг возникает из-за периодических ударов по нему спутной струи за конструкцией и проявляется в виде «раскачки», т.е. увеличения амплитуды колебания сооружения.

С точки зрения теоретической физики бафтинг – это явление является одним из известных в ряду реакций конструкций, которое с полной уверенностью можно отнести к наиболее опасным из-за их недостаточной изученности [36].

П. 12 [19] содержит критерий обеспечения аэродинамической устойчивости в виде

$$\frac{S_0}{H} > 50, \quad (1.3)$$

где S_0 — расстояние в свету между сооружениями или отдельными элементами сооружений, H — характерный размер сооружения поперек потока, в следе которого находится рассматриваемое сооружение, м.

П.12.2 [19] предписывает в случае невыполнения (1.3) руководствоваться результатами модельных испытаний в аэродинамических трубах.

Для балочных мостов, приведенных в п.5.4, согласно 5.6 следует в случае превышения расчетной скорости 25 м/с и соотношения ПС к высоте В/Н менее 3,5 проводить проверку на галопирование.

Галопирование – аэроупругие автоколебания элементов конструкций поперек потока, вызванные отрицательным аэродинамическим демпфированием, возникновение которого обуславливается нестационарной аэродинамической подъемной (поперечной) силой при определенной ориентации элементов конструкций относительно направления потока [36]. С увеличением скорости потока выше критического значения амплитуды таких колебаний нарастают в отличие от колебаний вихревого возбуждения. По этой причине галопирование представляет для элементов конструкций мостов большую опасность, чем вихревое возбуждение [36].

Критерий галопирования (критерий Глауэрта-Ден-Гартога) имеет вид [36]

$$c_y^\alpha + c_x < 0, \quad (1.4)$$

где $c_y^\alpha = \frac{dc_y}{d\alpha}$ – градиент измерения поперечной потоку подъемной силы по углу атаки элемента. Т.е., причиной возникновения явления галопирования является перемена знака физического параметра затухания энергии колебаний [36].

Критерий Глауэрта-Ден-Гартога является необходимым условием галопирования. В случае выполнения (1.4) вычисляют критическую скорость галопирования [36]

$$V_{кр}^{гал} = \frac{4m\delta f_{изг}}{|c_y^\alpha + c_x| \rho h}. \quad (1.5)$$

Технология предварительного анализа возможности возникновения аэроупругой неустойчивости типа галопирования на основе аэродинамических исследований динамически подобной жесткой секционной модели заключается в анализе аэродинамического коэффициента поперечной воздушному потоку силы C_y в зависимости от угла атаки α , наряду с коэффициентом лобового сопротивления C_x [36].

В работе [36] представлен критерий Казакевича устойчивости против галопирования

$$\frac{b}{h} > 3.6. \quad (1.6)$$

В п.9 [19] приведена методика, основанная на применении критерия того же критерия Глауэрта-Ден-Гартога. Предлагается вычислять число Глауэрта-Ден-Гартога по формуле

$$A_G = c_{ya}^\alpha + c'_x, \quad (1.7)$$

где c_{ya}^α – производная коэффициента подъемной силы поперечного сечения c_{ya} , приведенной к площади горизонтальной проекции ПС, по углу атаки α ;

$$c_{ya}^\alpha = \frac{\partial c_{ya}}{\partial \alpha} \quad (1.8)$$

при α , равном 0° ; c'_x – коэффициент лобового сопротивления, приведенный к площади горизонтальной проекции ПС, вычисляемый по формуле

$$c'_x = \frac{2X_a}{\rho V^2 BL}, \quad (1.9)$$

где X_a – сила лобового сопротивления; ρ – плотность воздуха; V – скорость ветра; B – характерная ширина сечения, м; L – длина рассматриваемого участка пролетного строения.

При этом критерием аэроупругой устойчивости по отношению к галопированию является положительное число Ден-Гартога

$$A_G > 0. \quad (1.10)$$

Нормативный документ [18] в п.9 допускает экспериментальное определение числа Ден-Гартога (1.10) в аэродинамических трубах при использовании секционной геометрически-подобной модели с помощью аэродинамических весов, также допускается проводить численные исследования.

Если число Ден-Гартога (1.7) оказывается отрицательным и критерий устойчивости (1.10) не выполнен, по методике п.9 [19] проверяется условие:

$$V_{\text{гал}} > 1,5V_{\text{расч}}, \quad (1.11)$$

где $V_{\text{расч}}$ — расчетное значение скорости ветрового потока в уровне конструкции в заданном районе строительства мостового перехода, $V_{\text{гал}}$ определяется по эквивалентной (1.5) [36] формуле

$$V_{\text{гал}} = \frac{2ScHf}{|A_G|}, \quad (1.12)$$

где Sc — число Скруттона, H — характерная высота поперечного сечения поперек ветрового потока, f — собственная частота.

Критерием устойчивости на галопирование в случае выполнения (1.4) в [36] является

$$V_{\text{гал}} > 2V_{\text{расч}}. \quad (1.13)$$

ГОСТ [18] также допускает считать проверку на галопирование выполненной при условии проведения физических исследований на динамически-подобных моделях в диапазоне скоростей от 0 до $1.5V_{\text{расч}}$ с учетом выполненных требований к проведению физических испытаний, содержащихся в [19] и отсутствия зафиксированных колебаний типа галопирования.

ГОСТ [19] содержит значения чисел Ден-Гартога для мостовых сооружений, состоящих из одной, двух, трех или четырех балок прямоугольной или трапециевидной формы сечения.

Согласно [36] **срывной флаттер** связан с сильными аэродинамическими нелинейностями, срывом потока и образованием вихрей Кармана, характеризует аэроупругие автоколебания преимущественно крутильного вида. Признаки срывного флаттера [36]:

- 1) ограниченная амплитуда, зависящая от скорости потока, крутильной собственной частоты и демпфирующих свойств конструкций при крутильных деформациях;
- 2) частота колебаний срывного флаттера, близкая к одной из собственных частот крутильных колебаний;
- 3) крутильные колебания доминирующие;
- 4) критическая скорость срывного флаттера, как правило, ниже критической скорости изгибно-крутильного флаттера.

В работе [36] критическая скорость срывного флаттера вычисляется по формуле

$$V_{\text{ср флат}}^{\text{кр}} = \frac{f_{\text{крут}} h}{Sh}. \quad (1.14)$$

Критерий невозможности возникновения срывного флаттера по ГОСТ [19] задан в виде

$$V_{\text{ср флат}} > 1,5V_{\text{расч}}. \quad (1.15)$$

где $V_{\text{ср флат}}$ — значение критической скорости срывного флаттера определяется путем выполнения аэродинамических исследований в диапазоне скоростей потока, достигающих $1,5V_{\text{расч}}$.

Для оценки возможности возникновения аэроупругой неустойчивости **изгибно-крутильного флаттер** в [19] используется критерий

$$V_{\text{флат}} > 1,5V_{\text{расч}}. \quad (1.16)$$

Критическая скорость изгибно-крутильного флаттера $V_{\text{флат}}$ или факт невозможности ее достижения в расчетном диапазоне скоростей ветра определяется путем выполнения аэродинамических исследований в диапазоне скоростей потока, достигающих $1,5V_{\text{расч}}$.

Изгибно-крутильный (классический) флаттер – связанные изгибно-крутильные, нарастающие во времени, самовозбуждающиеся колебания, вызванные несовпадением аэродинамического центра (точки приложения

аэродинамических сил) с центром изгиба поперечного сечения балки жесткости моста.

Работа [36] содержит следующий критерий устойчивости на изгибно-крутильный флаттер

$$f_{\text{крут}} > 2f_{\text{изг}}. \quad (1.17)$$

Документ [19] предписывает проведение физического моделирования в аэродинамических трубах на секционных моделях в следующих случаях:

- вантовых и висячих мостов;
- арочных мостов с гибкими подвесками и экстрадозных мостов
- случая трехмерного характера обтекания потоком воздуха поперечного сечения исследуемого конструктивного элемента;
- подтверждения эффективности аэродинамических средств гашения колебаний, перечисленных в Г.2.6 приложения Г [19], а также иных аэродинамических средств гашения, установленных дискретно по длине ПС;
- параллельных близкорасположенных мостовых сооружений в случаях, оговоренных в разделе 12, с периодом собственных колебаний по первой вертикальной форме выше 2 с.

При этом в дополнение к испытаниям секционной модели следует проводить:

- для висячих мостов;
- мостов, у которых пилоны имеют сложную пространственную форму или поперечные сечения пилон существенно отличаются от круглого или прямоугольного поперечного сечения;
- мостов с пилонами разной высоты или разной конструкции;
- параллельных вантовых и висячих мостов, находящихся в непосредственной близости друг к другу или находящихся вблизи существующего моста, в случаях, оговоренных в разделе 12;
- ПС мостов по 5.11 [19], расположенных на кривой в плане с радиусом менее 200 м; - мостов с пролетом более 500 м;

- мостов по 5.11 [19], расположенных в местности со сложным рельефом; - вантовых мостов в условиях городской застройки с высотой зданий более 20 м;
- мостов по 5.11 [19] через морские проливы, бухты и заливы;
- консолей на монтаже, составляющих исключение согласно 5.9;
- консолей вантовых мостов на стадии монтажа при максимальном вылете консоли.

Существует ряд научных работ на тему физического и численного моделирования ветровых воздействий на объекты транспортной инфраструктуры как отечественных, так и зарубежных авторов. В статье [89] приведены подходы к оценке склонности сооружений к аэродинамической неустойчивости. Рассмотрены особенности разных типов аэроупругих колебаний. В работе [202] исследуется индуцированная ветром неустойчивость мостовых конструкций.

В статье [115] исследуется аэродинамическая неустойчивость на примере двумерной задачи обтекания упрощенного участка гибкого подвесного моста (на реке Такома, США). Полученные результаты сравнивались с результатами инженерных расчетов. В отличие от существующих инженерных методик прямое численное моделирование взаимодействия конструкции с воздушным потоком позволяет учесть обратное влияние конструкции на поток, а также взаимное влияние нескольких видов аэродинамической неустойчивости.

В работе [203] автор исследует аэроупругие колебания пролетного балочного моста на этапе монтажа. Исследование проведено с помощью численного и экспериментального моделирования. Показано, что на этапе монтажа конструкция подвергается двум типам аэродинамической неустойчивости: вихревое резонансное возбуждение и галопирование.

В статье [146] экспериментально исследована аэродинамика 420-ти метрового пешеходного моста, выявлено явление флаттера двух видов аэродинамических секций. В результате установлено, что обтекатели не всегда эффективны для улучшения аэродинамической устойчивости моста. Прорезь в

центре балочной секции может значительно изменить состояние потока секции и является эффективной мерой для повышения устойчивости моста.

В работе [215] авторы экспериментально исследуют аэроупругую модель сверхдлинного моста, основной пролет которого составляет 2,8 км. Установлено, что коробчатая балка с прорезями применима для сверхдлинного моста.

В работе [215] предложена унифицированная модель аэродинамической силы. Для ее описания использованы аэродинамические коэффициенты, угол атаки, относительные смещения и скорость ветра. Предложенный подход реализован в разработанной программе. Полученные критерии проверяются на инженерных примерах большепролетных мостов. В [221] представлен численный анализ на флаттер вантового моста гавани Сяншань в Китае. Явлению флаттера на мостах также посвящена работа [207].

Вопросам моделирования ветровых воздействий на объекты транспортной инфраструктуры посвящено множество работ. В работах [169], [161] авторы проводят численное моделирование ветрового давления на крыше здания аэропорта. В работе [169] моделируется здание аэропорта в Цзинганшане, моделирование проведено с использованием RANS-подхода, модель турбулентности k-ε. Результаты численного моделирования сопоставляются с данными физических испытаний в аэродинамической трубе. Получена хорошая согласованность результатов. В [161] изучено распределение давления на уникальной конструкции аэропорта с изогнутой крышей. Аэропорт, рассматриваемый в исследовании, является одним из таких большепролетных сооружений длиной 210 м в длину, 115 м в ширину и 29 м в высоту, с двумя крышами с обеих сторон, имеющими разную высоту и кривизну, которая соединена с помощью центрального здания. Проведены испытания в аэродинамической трубе для оценки распределения давления на конструкцию аэропорта в условиях открытой местности. Работа [9] посвящена численному моделированию для определения параметров экстремальных климатических воздействий на здания и сооружения.

Работы [155] и [156] выполнены на интересную тему поиска оптимальной формы здания аэровокзала с учетом анализа аэродинамической формы здания. В [156] выбирается оптимальная форма здания с учетом техносферной безопасности здания при ветровых воздействиях и пешеходной комфортности пассажиров. В [155] авторы оптимизируют форму терминала аэропорта для поиска оптимального потока ветра вокруг проектируемого здания. Авторы предполагают, что данный метод может быть легко интегрирован в обычную архитектурную практику.

Уникальной в своей области является работа [168] «Ущерб, нанесенный ветром аэропорту: извлеченные уроки» («Wind Damage to Airport: Lessons Learned»), опубликованная в 1988 году: 17 июня 1985 года сильный ветер с максимальной скоростью 43 м/с обрушился на региональный аэропорт Колумбии в штате Миссури, нанеся серьезный ущерб припаркованным самолетам, ангарам, стеклянным окнам зданий, автомобилям и так далее. В работе изучаются причины таких чудовищных повреждений: например, что коэффициент порыва ветра этого типа намного выше, чем обычно предполагается при проектировании конструкций. Дополнительные выводы заключаются в том, что на атмосферное давление измеренного шторма сильно повлияло ветровое давление здания, в котором находился барометр, и что запад является преобладающим направлением сильных ветров в этом аэропорту. Из этого следует, что распределение экстремальных ветров тоже необходимо учитывать при проектировании. Уроки, извлеченные из исследования, могут быть очень полезны для уменьшения будущего ущерба от ветра в аэропортах и для улучшения понимания метеорологических данных, относящихся к сильным штормам, и того, как использовать эти данные в инженерной практике.

В работе [164] также изучен пример аварий на объекте транспортной инфраструктуры – повреждение крыши терминала ТЗ в Пекине вследствие сильного ветра. Исследование проведено с помощью численного моделирования. Сделан вывод, что ветровые потоки должны быть серьезно и комплексно рассмотрены при проектировании крупномасштабного терминального комплекса, а повреждение крыш происходит и из-за конфигурации самого здания.

Статья [165] устанавливает, что влияние конфигурации самого здания аэропорта и искусственных сооружений на полетные условия серьезно, и может вызывать внезапные изменения ветра на воздушных судах при определенных погодных условиях и должно быть учтено при проектировании для минимизации техногенных аварий на объектах транспортной инфраструктуры.

В работе [125] проведено экспериментальное исследование влияния ветра и снега на проектируемый пассажирский терминал аэровокзального комплекса.

В [223] с помощью испытаний в аэродинамической трубе исследовано ветровое воздействие на типовые станции высокоскоростной железной дороги в Китае. В [216] в аэродинамической трубе моделируется ветровое воздействие на кровлю железнодорожного вокзала. В [145] проводится численное моделирование ветровых нагрузок на крышу здания железнодорожного вокзала Шанхая, результаты сопоставлены с данными физических испытаний в аэродинамических трубах. Установлено, что за счет уменьшения консольной высоты крыши можно уменьшить нагрузки от ветра. В [120] с помощью испытаний в аэродинамической трубе исследованы пиковые ветровые давления на крыши железнодорожных станций Китая. Авторы [121] с использованием физического моделирования в аэродинамических трубах исследуют статические ветровые нагрузки на здание зала ожидания железнодорожных станций Китая. Результаты показывают, коэффициенты давления ветра на крыше зданий залов ожидания зависят от интерференционных эффектов.

Статья [154] изучает пешеходную комфортность на платформах железнодорожных вокзалов с использованием аэродинамической трубы. Предложены адаптированные формулы для расчета усредненных по площади коэффициентов давления ветра.

С точки зрения аэродинамического моделирования отдельным классом сооружений повышенного уровня ответственности транспортной инфраструктуры, являются решетчатые конструкции. Такие конструкции широко распространены в электрическом хозяйстве, в инфраструктуре для прокладки кабельных линий связи и т.д.

Аэродинамические силы, действующие на подобные конструкции, могут играть решающее значение для устойчивости конструкции [181]. В последние годы обзоры отказов линий электропередачи показывают, что большинство обрушений опор ЛЭП во всем мире объясняются экстремальными ветровыми явлениями [109], [167].

Аналитический расчет решетчатых конструкций на ветровые воздействия можно произвести с помощью действующих нормативно-регламентирующих и технических документов [108], [133], [149]. Нормативные документы рассматривают лишь отдельные примитивы, из которых формируется сложная геометрическая конструкция сооружения, но не предоставляют информацию по сооружениям сложной пространственной конструкции. Для сооружений повышенного уровня ответственности согласно отечественным нормативным документам аэродинамические коэффициенты необходимо устанавливать на основе рекомендаций, разработанных на результатах модельных испытаний в аэродинамических трубах [66]. Аналитический расчет по методикам приведенным, как в отечественных нормативных документах, так и в зарубежных дает лишь оценочную величину ветровой нагрузки (как правило, с большим запасом).

Эмпирическое выражение для аэродинамических коэффициентов решетчатых конструкций приведено в международных стандартах [134], [135], [137]. Однако для нетиповых конструкций сложных форм применение методик, содержащихся в нормативных документах, крайне затруднительно.

В работе [182] исследовано распределение коэффициента лобового сопротивления решетчатой конструкции с помощью математического моделирования для одного сегмента решетчатой конструкции, исследование выполнено для различных чисел Рейнольдса и различных углов атаки ветра. В работе [111] выполнено численное моделирование ветровых воздействий на телекоммуникационную мачтовую башню с использованием моделей турбулентности RANS. В [143] проведена серия экспериментов по полномасштабному моделированию ветровых воздействий на решетчатую мачту в

аэродинамической трубе и произведено сравнение полученных результатов с нормативным документом [137].

Решётчатые конструкции являются проницаемыми, что существенно усложняет численное и экспериментальное моделирование ветровых воздействий на них. Сложная компоновка элементов решетчатой башни требует большого количества узлов сетки, что требует значительных вычислительных ресурсов. Вместо того, чтобы погружаться в локальный поток вблизи одного элемента, исследователи больше озабочены моделированием состояния потока между элементами и тем, как решетчатая структура в целом нарушает внешнее поле потока. В последние годы использование пористых сред в CFD-моделировании оказалось эффективным способом экономии вычислительных затрат [119].

В работе [181] для вычисления коэффициента лобового сопротивления решетчатой конструкции используется метод пористых сред («porous media approach»), где геометрия сегмента аппроксимируется пористой структурой, имеющей соответствующий коэффициент пористости для упрощения геометрии. Полученные результаты сравниваются с данными, полученными экспериментально в аэродинамической трубе. Идея использования метода пористых сред состоит в том [119], что стретжи решетчатой структуры часто расположены в таком порядке так, что их можно рассматривать как зону с определенной пористостью. В [204] решетчатая конструкция рассматривается как правильная кубовидная пористая зона с равномерно распределенной пористостью.

Из-за сложностей установки контрольно-измерительных приборов и сбора данных от отдельных элементов конструкции в модели башни, метод синхронной системы с множественным измерением давления (SMPSS) не удобен для стальных решетчатых башен. Большинство существующих исследований, касающихся сил ветра на решетчатых башнях, были проведены путем испытаний на высокочастотных сило-моментных датчиках (HFFB) в аэродинамических трубах [217]. В работе [163] исследуется функция пространственной когерентности ветровых нагрузок на решетчатую каркасную конструкцию с помощью испытания в аэродинамической трубе. Результаты показывают, что ни одна из существующих

функций когерентности не может дать достаточно точную оценку функции когерентности ветровых нагрузок на решетчатую конструкцию. Кроме того, на функцию когерентности ветровых нагрузок влияют частота ветровых нагрузок, направление силы, поперечные и вертикальные расстояния. Затем на основе результатов испытаний в аэродинамической трубе разрабатывается выражение функции когерентности, специфичное для конструкции решетчатого каркаса.

В работе [218] проводится экспериментальное исследование в аэродинамической трубе высотной решетчатой башни. Показано, что коэффициенты аэродинамического сопротивления распределены неравномерно по высоте башни, полученные данные оказались наиболее близки к данным, представленным в [108], в то время как Еврокод [133] недооценивает ветровые нагрузки для подобных конструкций.

1.2.2.2. Снеговые воздействия

В подверженных обильному выпадению снеговых осадков северных регионах с большой продолжительностью холодного периода года точная оценка перераспределения снега на крышах объектов транспортной инфраструктуры под воздействием ветра чрезвычайно важна для проектировщиков.

Большинство современных норм и стандартов содержит данные по распределению снеговой нагрузки для набора типовых форм кровли. Информация о влиянии неравномерности распределения снеговой нагрузки на протяженные и сложные кровельных покрытия, возникающей по причине явления снегопереноса, в нормативных документах отсутствует. Как правило, при проектировании зданий и сооружений со сложной протяженной пространственной формой кровли используют результаты исследований в аэродинамических трубах.

В работе [112] авторы сравнивают требования к расчету снеговой нагрузки на покрытия зданий и сооружений в соответствии с нормативными актами технически развитых стран и объединений: России, Европейского Союза, Канады

и США. Выявлено, что в этих нормах общие подходы, тонкости расчета коэффициентов, набор стандартных покрытий и предложенные для них схемы коэффициента формы существенно различаются. Авторы [112] приходят к выводу, что такое положение отражает общую проблему определения снеговых нагрузок: в настоящее время не существует признанного единого научно-обоснованного подхода к определению снеговых нагрузок на покрытия даже самой простой формы.

В последние годы зарубежными и отечественными авторами было проведено значительное количество исследований, посвященных исследованию снегопереноса на кровле зданий и сооружений.

Большая часть этих исследований базируется на использовании масштабных макетов строительных конструкций и специальных веществ, моделирующих снег. Н. Изюмов и М. Микитюк [150], [151] использовали отруби в качестве вещества, моделирующего снег, при проведении испытаний в аэродинамической трубе, чтобы исследовать явление снегопереноса на нижнем уровне двухуровневой крыши при различных скоростях и направлениях ветрового потока.

М. О'Рурк и др. [178], [179] исследовали скорости снегопереноса на кровельных покрытиях различной формы в гидравлическом лотке с использованием перемолотой кожуры грецкого ореха и получили хорошее соответствие при сравнении с натурными исследованиями.

В настоящее время в качестве модельного материала при моделировании снеговых воздействий используются различные материалы. Например, кварцевый песок, пенопласт, древесная зола и др [158], [226]. В работе [220] в качестве модельного материала для испытаний в аэродинамической трубе используется мелкий кварцевый песок.

А. Флага и др. [141] проводили исследования снеговой нагрузки на различные варианты большепролетных кровельных испытаний в аэродинамической трубе, принимая во внимание теорию дисперсии (Польша, Политехнический университет Кракова). В качестве снегомоделирующего материала авторы предлагают использовать рыхлый материал, такой как

измельченный полиэстирол. Основное отличие от других разработок заключается в использовании фотограмметрического метода обработки результатов испытаний, основанного на лазерном сканировании и цифровой обработке фотографий.

Си. Чжоу и др. [226] смоделировали перераспределение снеговых нагрузок на ступенчатой плоской кровле при испытаниях в аэродинамической трубе с использованием частиц с различной плотностью. Испытания были выполнены с почти идентичной скоростью ветра и экспозицией по времени, чтобы гарантировать сопоставимость результатов испытаний (State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai).

В Институте технологий Харбина (Китай) и Политехническом университете Кракова применяются современные установки, моделирующие явление снегопереноса с учетом падения снега на модель исследуемого объекта. Данная установка представляет собой аэродинамическую трубу с генератором искусственного снега (Рисунок 1.20). Параметры частиц (размер, плотность, когезия) позволяют проводить испытания на масштабных моделях строительных конструкций.

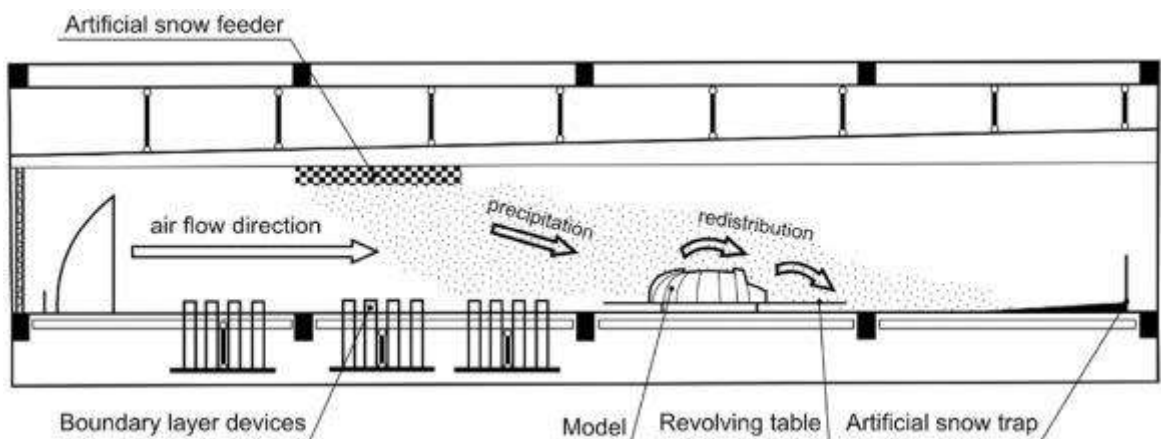


Рисунок 1.20– Аэродинамическая труба с генератором искусственного снега

На территории РФ моделированием снегопереноса и снегоотложений активно занимались в НИЦ «Строительство». «В.А. Отставновым (с участием Н.К. Жуковой – Свердловский архитектурный институт) разработана методика моделирования снегоотложений в аэродинамической трубе, позволяющая моделировать отложения снега древесной мукой. Используя эту методику, была

получена качественная картина снегоотложений на покрытия сооружений Олимпиады-80, БСА в Лужниках и для некоторых других пространственных конструкций покрытий. Ряд рекомендаций по расчетным схемам снеговых нагрузок для покрытий разработан Л.С. Розенбергом совместно с В.Д. Рейзером» [82].

Данная методика применялась при проектировании покрытия Большой Спортивной Арены стадиона в Лужниках. «Отсутствие нормативных документов по атмосферным нагрузкам вызвало необходимость выполнения комплекса исследований, проведенных в аэродинамической трубе ИМ МГУ. Для исследования характера снегоотложений поверхность модели покрытия покрывалась слоем древесной муки, имитирующей снег, и модель продувалась.

Продувка модели осуществлялась в двух вариантах конструктивного исполнения: с трансформируемой частью и без нее. Причем в первом случае ее состояние варьировалось (открыто, закрыто полностью, полуоткрыто). В результате переноса "снега" при продувке были получены картины его расположения по поверхности покрытия и на основании анализа результатов эксперимента определены численные значения коэффициентов распределения снега - t , которые характеризовали неравномерное распределение снега при различных углах воздействия ветрового потока на покрытие».

Н.А. Попов, И.В. Лебедева (ЦНИИСК) в своих работах, также активно прибегают к использованию данной методики [77]. «Методика моделирования снегоотложений на большепролетных покрытиях сложных форм была разработана в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко в конце 1970-х гг. Она основана на установлении качественного характера возможных снегоотложений на покрытиях зданий и сооружений путем продувки их моделей с нанесенным на поверхность имитатором снега в аэродинамической трубе при различных направлениях ветрового потока, с последующим численным анализом полученной картины распределения «снега». «Методика экспериментального определения основных закономерностей снегопереноса и образования снегоотложений на поверхности покрытий заключается в следующем. Модель сооружения покрывается равномерным слоем

имитатора снега (древесная мука) и устанавливается в рабочей части трубы. После этого осуществляется ее продувка при скоростях потока, плавно возрастающих от нуля до скорости, соответствующей началу отрыва и переносу частиц модельного материала с той или иной части модели. С началом переноса, определяемым визуально, продувка продолжается при постоянной скорости воздушного потока до стабилизации «снегоотложений».

Наиболее подробно методика экспериментальных исследований для определения расчетных параметров снеговых нагрузок описана в работе Лебедевой И.В. и др. [42]. В данной работе отмечены основные недостатки моделирования снегопереноса в аэродинамических трубах:

«Однако методика моделирования снеговых нагрузок в аэродинамических трубах предполагает установление лишь качественной картины снегоотложений на покрытии при различных направлениях снегопереноса, с учетом зданий окружающей застройки, и не позволяет получить численные значения снеговой нагрузки. Кроме того, экспериментальное моделирование не предусматривает учет последовательного накопления снегоотложений в течение зимнего периода, которое происходит за серию снегопадов при различных направлениях ветра, а также той доли снега, которая выпадает в безветренную погоду. Модельный материал, используемый при проведении испытаний, не обладает свойствами кристаллизации и сцепления, которыми обладает реальный снег, который уже выпал на покрытие. Нет возможности также экспериментально оценить сползание кристаллизованных масс снега в периоды оттепелей и в весенний период.

Процесс накопления снегоотложений на покрытиях зданий в зимний период имеет очень сложную физическую природу, которую необходимо учитывать косвенным путем. Поэтому при разработке рекомендаций по назначению расчетных снеговых нагрузок на основе результатов модельных испытаний в аэродинамических трубах должны быть разработаны методы и способы перехода от полученных качественных распределений снегоотложений по покрытию к численным характеристикам снеговой нагрузки и значениям коэффициента формы μ ».

Приведены основные требования к моделированию снеговой нагрузки в аэродинамических трубах, Общие принципы перехода от качественных схем распределения снеговых нагрузок по покрытию к назначению численных значений коэффициента формы μ , а также пример проведения экспериментальных исследований на модели стадиона. В качестве имитатора снега используется древесная мука.

Профессор А.А. Семенов с аспирантами Уфимского государственного нефтяного технического университета совместно со специалистами Новосибирского отдела Научно-исследовательской и проектно-строительной фирмы УНИКОН проводили экспериментальные исследования снеговой нагрузки на покрытия цилиндрических резервуаров в специализированной аэродинамической трубе архитектурно-строительного типа. В качестве модельного материала применялась древесная мука [78].

В диссертации Порываева И. А. [79] приводится достаточно подробное описание, как самой методики, так и снегомоделирующего материала:

Для моделирования снега используется древесная мука с диаметром частиц 0,1...0,2 мм, влажностью (7...9) %.

Порядок моделирования:

- на модель наносится слой древесной муки толщиной до 1мм по всей поверхности;

- включается аэродинамическая труба на режим малой скорости потока $v=2\text{ м/с}$. Продолжительность продувки определяется визуально. Если нет движения частиц древесной муки под действием воздушного потока, то скорость потока увеличивается на 0,5 м/с и продолжается наблюдение. Цикл увеличения скорости потока повторяется до начала движения частиц муки по поверхности кровли модели, далее ведется наблюдение состояния полного сноса слоя муки и отложения муки в пазухах модели. После этого выключить поток, вновь нанести слой муки толщиной 1мм. на поверхность покрытия и повторить опыт. Опыты повторяются до стабилизации картины сноса частиц муки и отложения ее в пазухах;

- конечные формы отложений древесной муки на поверхности покрытия модели регистрируются на фотопленку, измеряется высота отложений, а процесс перемещения частиц снимается на камеру;

- указанные в предыдущем пункте опыты проводятся для направлений ветра, принятых для оценки.»

Основным недостатком использования снегомоделирующих материалов различных типов является отсутствие возможности моделирования климатических процессов, сопровождающих выпадение снегового покрова – изменение температуры и влажности, адгезия и когезия, образование обледенения и др. Данные процессы моделируются в специализированных климатических аэродинамических установках. При этом моделирование снегового покрова осуществляется с использованием снеговых пушек/генераторов и условия проведения исследований максимально близки к натурным. Существенным недостатком данной методики является необходимость моделирования сооружений и их элементов в реальном размере (масштаб 1:1), что, с учетом ограниченных размеров рабочей зоны климатической аэродинамической трубы делает невозможным моделирование снегопереноса и снегоотложений на поверхности крупногабаритных сооружений. Как правило в таких установках исследуются отдельные элементы строительных конструкций.

Сотрудниками Учебно-научно-производственной лаборатории по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций НИУ МГСУ проведен ряд исследований процессов снегопереноса и снегоотложений на кровельных покрытиях аэропортовых комплексов.

Помимо исследований воздействия снеговой нагрузки на кровлю зданий и сооружений, автору известны работы, направленные на исследование снегопереноса на территории пешеходных зон городской застройки. Такие исследования проводились в Японии в Строительном научно-исследовательском университете Хоккайдо [213]. Исследовалась территория, расположенная в северной части Японии, где наблюдаются холодные снежные зимы, осложненные сильными ветрами. В работе смоделированы не только снеговые нагрузки, но и

явление переноса снеговых масс ветром. Проектируемая площадь должна быть комфортной для пешеходов – безбарьерной средой, доступной для пожилых людей и инвалидов, следовательно, на ней должно собираться как можно меньше снега, при этом на площади должны находиться коммерческие постройки и стойки с информацией. Задачей эксперимента являлся выбор наиболее оптимального расположения объектов на площади таким образом, чтобы обеспечить отсутствие скопления сугробов на пешеходных зонах и легкую уборку снега. Снег моделировался с помощью измельченного в порошок белого песка, который по свойствам похож на снег в Японии. В ходе работы было рассмотрено несколько вариантов расположения объектов на площади, для каждого варианта была получена картина распределения снежного покрова и снегопереноса, и выбран оптимальный проект площади, минимизирующий негативное влияние снеговых воздействий на проектируемую площадь.

В работе [114] рассмотрена и критически оценена существующая практика разработки рекомендаций по заданию снеговых нагрузок в российских лабораториях.

Вопросам моделирования снегопереноса на мостовых конструкциях посвящено малое количество работ. В работе [224] поднимается вопрос необходимости учета снегоотложений и снегопереноса при проектировании мостов в заснеженных регионах. Использовано численное моделирование в двумерной постановке.

В работе [130] исследуется аэродинамическое воздействие снега на настил мостов. С помощью численного моделирования произведен сравнительный анализ аэродинамических воздействий до и после снегопада. Согласно полученным результатам, снег оказывает заметное влияние на аэродинамические характеристики настилов мостов.

В статье [113] проводится обзор существующих в настоящее время математических моделей и численных методов, используемых для расчета форм снежных отложений. Авторы [113] особо подчеркивают важность «симбиоза» между классическими экспериментальными методами и современными

численными моделями, а также тот факт, что только совместное использование подходов может всесторонне описывать моделирование снегонакопления и переноса снега и давать более качественные решения более широкий спектр проблем.

В работе [225] проведено численное моделирование процессов снегоотложений и снегопереноса на поверхность крыши здания аэровокзала аэропорта. Среднее давление ветра в терминале 3А международного аэропорта Пекина, полученное в результате испытания в аэродинамической трубе и численного моделирования, сначала сравнивается, чтобы в некоторой степени проверить надежность результатов CFD. Затем численно моделируются характеристики распределения снега на крыше здания. Наконец, анализируется влияние некоторых основных параметров, включая тип модели турбулентности, порог скорости трения, величину скорости ветра и направления ветра, на снежный занос.

Публикация [10] посвящена проблеме совершенствования нормативной базы, регламентирующей назначение нагрузок, воздействий и их сочетаний при строительстве новых, расширении, реконструкции и перевооружении действующих предприятий, зданий и сооружений, в части обеспечения получения решений для адекватного моделирования снегоотложений.

В работе [222] исследованы снеговые нагрузки на кровлю терминала международного аэропорта Пекина. Снегоперенос моделируется численного как двухфазное течение.

В работе [159] исследованы причины обрушения кровель 19 различных зданий. Авторы приходят к выводу, что основными причинами обрушения кровли являются: чрезмерное количество снега, вызванное изменением климата, а также несоответствие проекта и исполнительного проекта из-за отсутствия строительного инспекционного контроля при строительстве зданий.

В работе [219] экспериментальное моделирование снеговых воздействий проводится с использованием нового критерия подобия – модифицированного числа Фруда.

1.2.2.3. Влияние наледи на конструкциях

Взаимодействие ветра с обледенелыми элементами конструкций является собой наиболее яркий пример неблагоприятного сочетания двух метеорологических явлений — ветрового потока и гололедо-изморозевых отложений, а также его влияния на прочность и надежность сооружений в целом и их отдельных элементов [36].

При всех прочих равных условиях обледенение конструкций ухудшает их обтекание ветровым потоком, а именно:

- возрастают компоненты ветровой нагрузки;
- снижаются значения критической скорости явлений аэроупругой неустойчивости.

Основная причина этого связана с изменением формы поперечного сечения элементов конструкций.

Образование гололедо-изморозевых отложений на элементах конструкций различного назначения, особенно на канатах и вантах, на линиях электропередач, связано с осадждением и замерзанием переохлажденных капель воды в среде дождя и тумана, мокрого снега, при сублимации водяного пара. В зависимости от процессов образования отложений виды обледенения элементов конструкций подразделяются на группы и подгруппы согласно физико-генетической классификации наземного обледенения [36], составленной А.Д. Заморским.

Реальность образования гололедо-изморозевых отложений на элементах конструкций иллюстрируют Рисунок 1.21–Рисунок 1.23.

Основные факторы, влияющие на образование гололедо-изморозевых отложений, следующие:

- отметки высотного положения элемента конструкции;
- характерные размеры его поперечного сечения — диаметр, высота и ширина;
- скорость и направление ветра;

- характер подстилающей поверхности: лес, водоем, степь и т.д.;
- метеорологические условия — температура, влажность, осадки.



Рисунок 1.21– Кристаллические образования на поверхности деревянных опор ЛЭП малой мощности

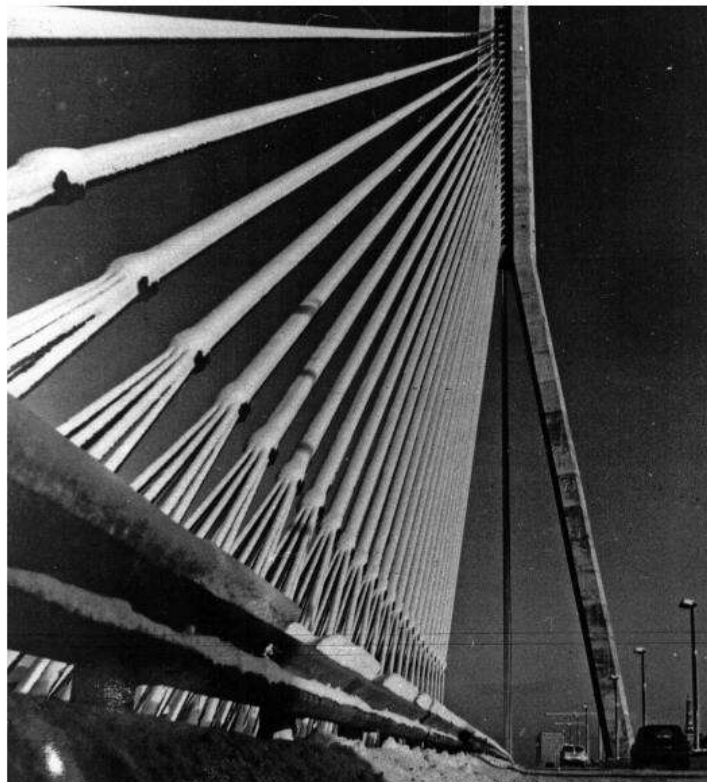


Рисунок 1.22– Отложения мокрого снега на вантах моста через р. Даугаву в г. Риге



Рисунок 1.23 – Гололедо-изморозевые отложения на канатных элементах подвесок висячего моста аммиакопровода через р. Днепр у г. Днепропетровска

Анализ различных форм гололедо-изморозевых отложений на элементы конструкций, представленных в Атласе обледенений [36] и приведенных на Рисунок 1.24, позволил выделить несколько вариантов для исследования аэродинамических качеств s_x , s_y , m_z (Рисунок 1.25).

На Рисунок 1.26 представлены результаты таких исследований, которые свидетельствуют о наличии нескольких диапазонов угла атаки α , обуславливающих существование реальной возможности возникновения аэроупругой неустойчивости типа галопирования и, как следствие, обрыва проводов ЛЭП.

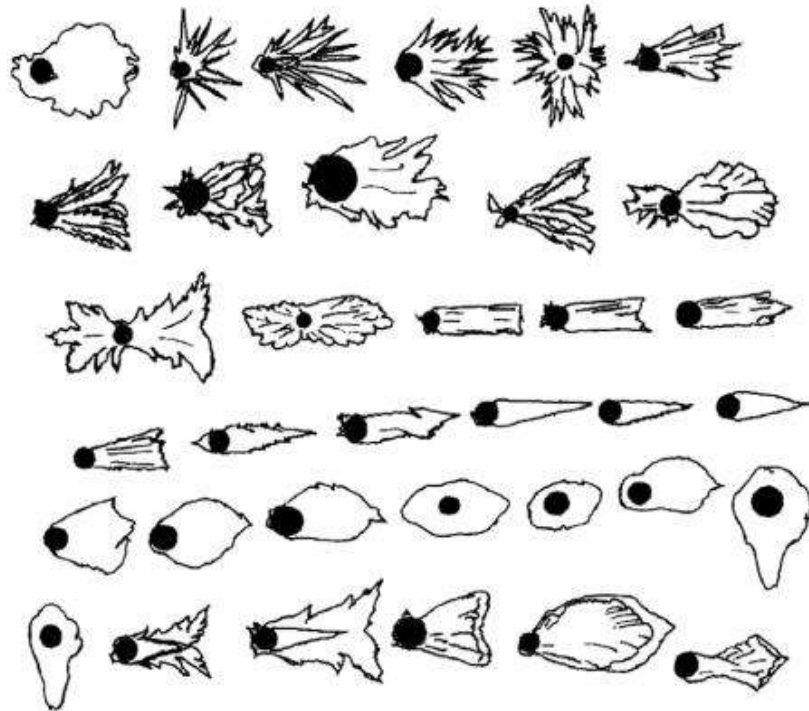


Рисунок 1.24 – Характерные формы гололедо-изморозевых отложений по Бучинскому [36]

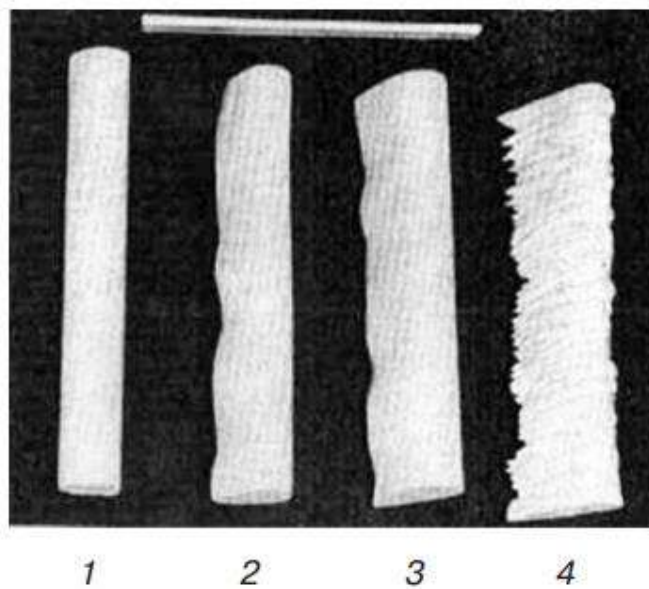


Рисунок 1.25 – Типы моделей элементов конструкций с наледью

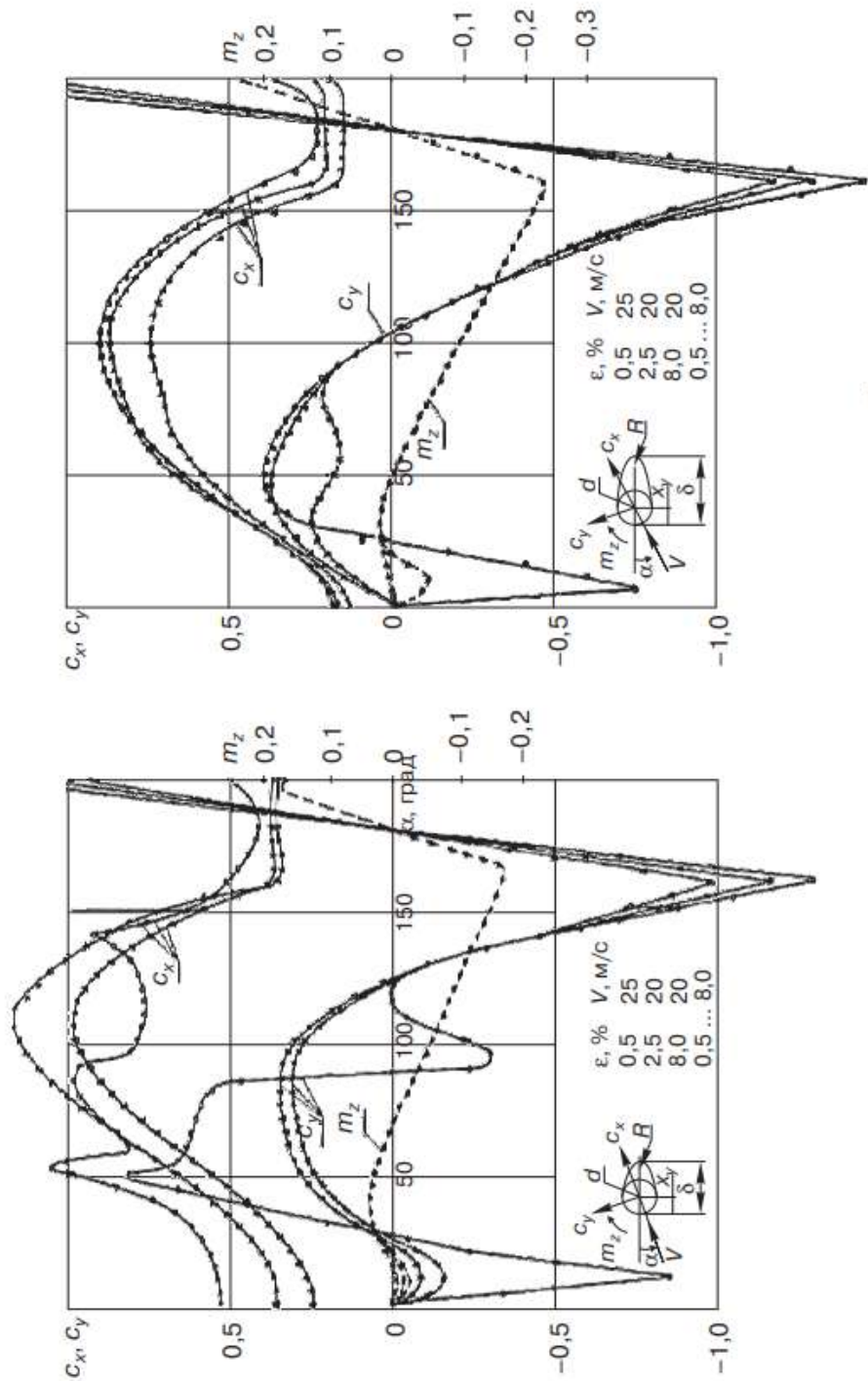


Рисунок 1.26—Аэродинамические характеристики типов моделей наледи 2 (а) и 3 (б)

Тематике исследования влияния наледи и гололеда на мостовые конструкции посвящено малое количество работ. Интересны работы [176] и [209], представленную на эту тему.

В [176] обсуждаются меры по снижению риска гололедно-изморозевых отложений на вантовых мостах. За последние два десятилетия были опробованы многочисленные методы предотвращения обледенения вант мостов, но ни один из них не был широко признан пригодным для практического применения. В данной работе представлена основная информация о явлении атмосферного обледенения и обзор известных происшествий. За этим следует всесторонний обзор существующих технологий предотвращения, удаления, защиты от наледи, принятых или разработанных для мостовых вант.

В [209] исследована восприимчивость большепролетных мостов к наледи и снегу. С использованием испытаний в аэродинамических трубах установлено, что реакции сооружения на вихревой резонанс усиливаются по мере того, как ограждения становятся все более заблокированы снегом или льдом. Авторы пришли к интересному выводу, что основной проблемой действия наледи и снега становится аэродинамическая устойчивость мостов, а не увеличение нагрузки от ветра.

В [166] проведены исследования геотермальной мостовой противообледенительной системы с наружным обогревом.

1.3. ОБЗОР ТРЕБОВАНИЙ К ПРОВЕДЕНИЮ ФИЗИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СООРУЖЕНИЙ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ

Документ [19] содержит требования к проведению физических испытаний мостовых сооружений в аэродинамических трубах (АДТ), ключевыми требованиями к проведению эксперимента является обеспечение динамического подобия по следующим числам подобия:

- число Коши;
- число Ньютона;
- число Скрутона;

- число Рейнольдса.

Число Струхала следует определять по результатам проведенных в аэродинамической трубе физических исследований на динамически подобных моделях.

ГОСТ [19] прописывает требования отдельно для секционной и полной динамически-подобным моделям.

Основные требования к секционным испытаниям согласно [19] следующие:

- для определения аэродинамических коэффициентов используется геометрическая подобная модель, при этом числа Рейнольдса в эксперименте не менее 10 000;

- для проверки аэродинамической устойчивости ПС используется динамически-подобная модель; число Рейнольдса так же не менее 10 000;

- требования к масштабу модели – не менее 1:75, при этом отношение длины модели к ее ширине не должно быть меньше четырех. Прописано требования к коэффициенту загромождения («blocking») должен быть не более 10%. В зарубежной литературе [107] встречается более жесткое требования к коэффициенту блокировки – не более 8%. ГОСТ [19] допускает отступление от данных требований. Однако отступление от требований должно быть обосновано;

- собственная частота секционной модели как тела на жестких опорах должна превышать частоту колебаний секционной модели на упругих подвесах испытательного стенда не менее чем в два раза;

- установлен диапазон углов атаки при проведении испытаний на секционной модели: от $+5^{\circ}$ до -5° ;

- установлены требования к потоку: исследование проводится в ламинарном потоке (интенсивность турбулентности не более 0,5%), если необходимо, возможен равномерный турбулентный поток. интенсивность турбулентности назначается исходя из типа местности, высоты сооружения, прочих индивидуальных особенностей местности расположения сооружения. При отсутствии соответствующих изысканий интенсивность турбулентности следует назначать не

более 7 %. Для моделирования турбулентности при проведении физического моделирования рекомендуются использовать турбулизирующие сетки;

– рекомендуется учитывать зависимость аэродинамических характеристик и диссипативных свойств от режима колебаний.

Основные требования к полной динамически-подобной модели согласно [19]:

– используется для исследований явлений аэроупругой неустойчивости и их параметров для сооружения в целом и его отдельных элементов для вантовых, висячих и арочных мостов (для стадий эксплуатации и монтажа). В эксперименте необходимо соблюсти подобие по числам N_w , Sc , Ca , а также обеспечить во время проведения эксперимента значение числа Рейнольдса не менее 10 000;

– требования к масштабу: не менее 1:150. Отношение максимального размера модели к соответствующему размеру (ширине/высоте) рабочей части аэродинамической трубы не должно превышать 0,85. Прописано требования к коэффициенту загромождения («blocking») должен быть не более 10%. ГОСТ [19] допускает отступление от данных требований. Однако отступление от требований должно быть обосновано;

– исследование должно быть выполнено для минимального набора углов скольжения, соответствующих направлению ветра вдоль моста и перпендикулярно к оси моста с учетом симметрии. Дополнительно рекомендуется проводить испытания для двух и более промежуточных углов скольжения при сложной форме пилонов вантовых и висячих мостов;

– для исследований явлений аэроупругой неустойчивости и их параметров для консолей на монтаже рекомендуется использовать полные динамически-подобные модели;

– установлены требования к потоку: исследование проводится в ламинарном потоке (интенсивность турбулентности не более 0,5%) и градиентном турбулентном потоке;

– испытывать полномасштабную модель рекомендуется в ландшафтных аэродинамических трубах;

– существуют требования к моделированию отдельных частей рельефа и застройки (геометрическое подобие) при наличии сложного рельефа (горные ущелья, холмы и т.д.);

– рекомендуется выбирать масштаб скорости, позволяющий моделировать диапазон натуральных скоростей;

– диапазон скоростей ветра для проведения исследований рекомендуется определять исходя из значения расчетной скорости в уровне сооружения $V_{расч}$ и теоретической возможности развития отдельных явлений аэроупругой неустойчивости, но не менее $1,5V_{расч}$;

– при выполнении исследований скорость потока рекомендуется изменять от минимально возможной в соответствии с техническими характеристиками аэродинамической трубы до максимальной с шагом $\approx 5\%$ от исследуемого диапазона скоростей. В случае возникновения на модели опасных колебаний шаг изменения скорости потока рекомендуется уменьшить до $\approx 2\%$ от исследуемого диапазона скоростей;

– перед проведением испытаний необходимо выполнить контрольное измерение собственной частоты колебаний модели;

– аэродинамические трубы должны быть аттестованы, средства измерения должны иметь метрологические свидетельства о поверке.

В работе [36] перечислены следующие серьёзные недостатки полномасштабного моделирования:

1. Высокая стоимость и значительные сроки.
2. Высокая стоимость энергетических затрат на создание воздушного потока в аэродинамической трубе, адекватного структуре и параметрам реального турбулентного ветрового потока с учётом его пульсационных свойств и розы ветров в приземном слое атмосферы в зоне строительства.
3. Полномасштабное моделирование очень редко предоставляет авторам проекта достоверную научную информацию о фактических критериях возникновения и условиях существования явлений аэроупругой неустойчивости сооружения в целом, а также об аэроупругом взаимодействии между пролётным

строением, пилоном и вантами мостов в поле подвижных нагрузок и ветровых воздействий. Например, для гибких мостовых систем (висячих, вантовых, арочных) такими компонентами являются пролётное строение, пилоны, ванты, стойки, подвески в поле ветровых воздействий и подвижных нагрузок, в т.ч. наливных составов и пешеходов.

4. Требуется соблюдения одновременно целого ряда фундаментальных критериев подобия в полном соответствии с теорией подобия, что при значительных параметрах реальных сооружений и их гибкости чрезвычайно затруднительно, а в большинстве случаев невозможно осуществить физически ввиду противоположных эффектов их влияния.

5. Чрезвычайно сложно варьировать или корректировать основные массовые, жёсткостные и диссипативные свойства модели при возможных изменениях конструктивных решений в процессе проектирования, что весьма реально для современных сложных сооружений.

Приложения И и Ж главного документа проектировщика СП [90] содержит общую методику проведения модельных испытаний зданий и сооружений в аэродинамических трубах. В СП [90] обозначена цель проведения испытаний, указана необходимость выполнения критериев подобия, к существенным критериям подобия отнесены: геометрическое подобие, подобие структуры потока, подобие по числу Рейнольдса или выполнение более слабого требования о необходимости реализации автомодельного режима, подобие основных динамических характеристик. Коэффициент блокировки установлен в 8%. Скорость потока ограничена до 60 м/с. Оборудование должно быть аттестовано в соответствии с требованиями по их эксплуатации и использованию. Приведены требования по оформлению результатов аэродинамических испытаний.

В 1995 году по решению Правительства в связи с необходимостью введения нормативных документов, регулирующих строительство высотных зданий, были разработаны Московские городские строительные нормы «Многофункциональные высотные здания и комплексы» (МГСН 4.19-05) [52].

МГСН 4.19-05 [52] дополняют СП 20.13330.2011 [90] и регулируют строительство зданий высотой 75-400 м. МГСН 4.19-05 [52] при расчете данных сооружений на нагрузки от ветра предписывает назначение аэродинамических коэффициентов по результатам физического моделирования в аэродинамических трубах [52]. В пункте 15 «Санитарно-гигиенические требования» [52] сказано: «при проектировании высотных зданий необходимо осуществлять оценку ветрового режима и аэродинамических показателей, однако сама методика проведения испытаний отсутствует».

В 2006 году в ОАО «ЛЕННИИПРОЕКТ» г. Санкт-Петербург были разработаны Территориальные строительные нормы «Жилые и общественные высотные здания» [97], являющиеся нормативным документом для строительства в г. Санкт-Петербург. Данные нормы распространяются на проектирование жилых и общественных зданий высотой до 150 м (жилые здания высотой более 75 м, общественные здания – более 50 м), а также комплексов таких зданий. В территориальных нормах Санкт-Петербурга подобно МГСН 4.19-05, указывается на необходимость проведения аэродинамических испытаний для высотных зданий из-за их сложной аэродинамики [97], методика испытаний отсутствует, однако отмечается необходимость наличия аттестационных документов для аэродинамической трубы.

В конце 2006 в «НИЦ «Строительство» (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко) разрабатываются «Временные рекомендации по назначению нагрузок и воздействий, действующих на многофункциональные высотные здания и комплексы в Москве», где актуализированы существующие нормативные методики для проектирования многофункциональных высотных зданий и комплексов. В МДС «Временные рекомендации по назначению нагрузок и воздействий, действующих на многофункциональные высотные здания и комплексы в Москве» (Дата актуализации: 12.02.2016) [53] приводятся основные требования к проведению модельных аэродинамических испытаний, а именно:

- соблюдение критериев аэродинамического подобия;
- моделирование ситуационного плана в радиусе $r \geq h$ (h – высота здания);

- подобие основных динамических свойств;
- моделирование турбулентной структуры реальных ветровых режимов, включая вертикальный градиент средней скорости ветра и энергетический спектр ее пульсационной составляющей.

В мае 2016 г. на территории РФ введен в действие ГОСТ Р 56728-2015 «Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции». Пункт 5.4 [20] содержит общие требования к проведению экспериментального моделирования ветрового воздействия, а именно:

- необходимость моделирования структуры нормативного ветра (схематизированная модель приземного пограничного слоя);
- необходимость соблюдения правил геометрического подобия при изготовлении макета, требования к масштабу макета;
- введено понятие h_q – фактора, для контроля неравномерности потока;
- необходимость обеспечения автомодельности по числу Рейнольдса при проведении испытаний;
- требования к результатам исследований и сопроводительной документации.

Нормативным документом в части назначения нагрузок от ветра в Европейском союзе является Еврокод 1 «Воздействия на конструкции. Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые нагрузки» (Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions) [136].

Требования о проведении экспериментальных исследований документ [136] не содержит, но гласит, что «в дополнение к настоящему техническому кодексу можно применять аэродинамические испытания, апробированные и/или сертифицированные численные методы при соответствующем моделировании структуры естественного ветра». Аэродинамические испытания согласно [136] регламентируются национальными приложениями к Еврокоду.

Английское национальное приложение [214] содержит рекомендации для проведения аэродинамических испытаний:

- 1) необходимость моделирования градиентной скорости ветра, учета окружающей застройки, масштаба турбулентности;

- 2) соответствие масштабов модели конструкции и профиля ветрового потока;
- 3) для динамических испытаний при моделировании вводится требование учета массово-инерционных характеристик проектируемого сооружения.

Национальное приложение Англии ссылается на рекомендации, выпущенные Обществом ветроинженеров Американского общества гражданских инженеров: «Аэродинамические испытания зданий и сооружений» (Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures) [118].

В Италии существует «Руководство по расчету конструкций на ветровые воздействия» (Guide for the assessment of wind actions and effects on structures [147], разработанное Итальянским Национальным исследовательским советом. В руководстве для протяженных в плане конструкций, сооружений нестандартных форм рекомендуется проводить аэродинамические испытания, авторы [147] также рекомендуют проводить испытания для оптимизации нестандартных конструкций, поскольку из этого можно извлечь не только экономическую выгоду, но и повысить безопасность таких конструкций. В данном руководстве представлены следующие рекомендации для проведения аэродинамических испытаний: должны быть надлежащим образом промоделированы все физические величины; масштаб следует выбирать индивидуально в зависимости от конкретной задачи; проектирование и изготовление макетов, испытания и интерпретация результатов должны проводиться специалистами в специализированных лабораториях. В аэродинамической трубе должна быть возможность воспроизведения профиля ветра в пограничном слое, так для вертикальных конструкций должны быть смоделированы скорость и интенсивность турбулентности. Для макетов сооружений должны быть соблюдены геометрическое и динамическое подобие. Такие испытания можно проводить только в трубах, способных смоделировать пограничный слой. Характеристики потока должны быть постоянны в течение всего испытания.

Для того, чтобы по результатам испытаний можно было определить реальные ветровые характеристики, должны быть выполнены следующие условия:

- равенство безразмерных параметров (число Рейнольдса, число Струхаля, интенсивность турбулентности) модели и реального объекта;
- применение одного масштаба для величин с одинаковой размерностью, например, параметры, имеющие длину в размерности (геометрические размеры, масштаб длины турбулентности, величина атмосферного пограничного слоя);
- масштабы различных физических величин должны удовлетворять размерным уравнениям, так, масштаб скорости (отношение скорости в трубе к реальной скорости) должен соответствовать масштабу времени.

Удовлетворить всем отношениям трудно, поэтому на практике используют упрощенные модели. Выбор констант масштабирования является чрезвычайно сложной задачей, их выбор и отказ от удовлетворения тем или иным соотношениям должен быть строго обоснован. В частности, необходимо убедиться в том, что:

- для вертикальных конструкций средняя скорость и интенсивность турбулентности должны воспроизводить реальные до высоты, превышающей максимальную высоту конструкции, хотя бы в 1,5 раза;
- масштаб модели конструкции должен быть как можно ближе к масштабу профиля ветрового потока.

Для точного моделирования аэродинамики необходимо равенство чисел Рейнольдса модели и реального объекта, однако на практике это условие часто не выполняется, и для конструкций с остrokонечной геометрии приводит к незначительным ошибкам (при соблюдении остальных условий), а для зданий округлых форм ошибки становятся существенными. В этом случае особое внимание должно быть уделено обработке результатов.

Одним из возможных способов решения проблемы с несоблюдением числа Рейнольдса является увеличение шероховатости поверхности модели относительно фактического значения. В аэродинамических трубах имеет место «эффект блокировки потока», который приводит к изменению величины давления на поверхности модели, что надо принимать во внимание при выборе масштаба модели.

Для исключения этого эффекта проекция площади занимаемого моделью объема на площадь поперечного сечения трубы – так называемый «коэффициент блокировки» – не должна превышать 5% от площади поперечного сечения самой трубы. Незначительное увеличение коэффициента блокировки, в пределах 10%, приводит к небольшим ошибкам, но всё же, может считаться допустимым в конкретной ситуации. Если коэффициент блокировки превышает 10%, то измерения считаются некорректными. Кроме того, статическое давление должно быть постоянным вдоль всей длины трубы. Изменение статического давления, возникающее от блокирования моделью потока и формирования сдвиговых течений вдоль пола, потолка и боковых стенок могут быть компенсированы, если труба оснащена подвижными боковыми стенками или потолком. Если здание расположено в зоне сложной топографии, то при аэродинамических испытаниях необходимо использовать топографические модели. Чтобы выяснить особенности течения, измерения должны проводиться с использованием приборов, имеющих высокую точность, при этом точек измерения должно быть достаточно. Продолжительность испытания должна составлять от 600 до 3600 с в реальном времени, затем снижаться за счет масштаба по времени. Испытания должны проводиться для различных углов атаки ветра с шагом 10-45 градусов. Альтернативой дискретных измерений может стать метод визуализации потока (PIV), который позволяет измерять поля скоростей в заданной плоскости. Давление измеряют приборами для измерения давления с высокой степенью дискретизации. Точность измерений зависит от самого эксперимента, его целей, оборудования, однако расположение самих трубок играет важную роль, неправильное расположение трубок приводит к значительным ошибкам. Масштаб модели должен выбираться в зависимости от типа конструкции и от размера самой трубы. Для зданий масштаб колеблется от 1:400 до 1:50. Модели должны быть геометрически неизменяемые, поскольку изменяемость модели приводит к ошибкам в вычислении давления. На заключительном этапе должны быть известны средние силы и результирующие напряжения, действующие на поперечное сечение, эти данные можно вычислить путем интегрирования измеренного

давления. В качестве альтернативы для высотных зданий и других вертикальных сооружений можно использовать метод высокочастотного анализа. Метод называется высокочастотным, потому что собственные частоты модели должны быть во много раз больше собственных частот реального объекта. Если конструкция имеет линейные моды продольных и поперечных колебаний, то искомые изгибающие моменты являются результатом действия обобщенных сил. Поэтому аэродинамические испытания состоят из измерений в разные моменты времени основных изгибающих моментов и, возможно, поперечных сил, действующих на жесткую модель. С другой стороны, если формы колебаний отличны от линейных, необходимо применять поправочные коэффициенты. Аналогичные соображения можно использовать для обобщенных сил при первой моде крутильных колебаний. В любом случае, особое влияние необходимо уделить конструкциям, имеющим связанные моды колебаний. Модели, созданные для определения аэродинамических сил, должны быть жесткими и иметь небольшую массу. Эти модели должны быть смонтированы так, чтобы измерять компоненты сил в основании здания.

Геометрический масштаб обычно колеблется между 1:100 и 1:400. Измерения должны быть выполнены для как можно большего количества углов атаки, шаг – 10-30 градусов. Когда аэродинамические коэффициенты и силы вычислены, все значения следует задокументировать. В частности, в отчетной документации особенно четко следует указать

- типы проводимых испытаний (с описанием трубы и ее характеристик, измерительного оборудования, обоснование выбора масштаба);
- характеристики потока (профиль скорости, интенсивность турбулентности);
- коэффициенты масштаба (с анализом исходных данных, пересчетом на реальный объект).

Согласно стандартам Американского общества гражданских инженеров «Расчет зданий и сооружений на нагрузки» (ANSI/ASCE 7-02 American Standard of

American Society of Civil Engineers) [107] для зданий и сооружений простых форм расчет на ветровые нагрузки может быть выполнен аналитически.

В ряде случаев должны проводиться аэродинамические испытания, как то: нетиповые формы сооружения; упругие конструкции, для которых возможно возникновение различных явлений аэродинамической неустойчивости; возможность туннельных эффектов; особые ветровые режимы в районе строительства. Документ [107] содержит ряд требований к проведению экспериментальных исследований в аэродинамических трубах: моделирование профиля скорости, требование к геометрическому подобию модели, окружающей застройки и топографии местности, удержание коэффициента блокировки (загромождения) при проведении испытаний менее 8%; проведение испытаний в зоне автомодельности по числу Рейнольдса; соблюдение массово-инерционных и частотных характеристик при проведении динамических испытаний.

В разделе [107], посвященном рекомендациям по расчету на снеговые нагрузки, говорится о достоверности результатов исследования явлений снеготранспорта и снегоотложений в аэродинамических трубах и гидравлических лотках и о необходимости их проведения при расчете снеговой нагрузки на кровельные покрытия сложной формы. Испытания должны проводиться с использованием рекомендаций [107].

В Австралии и Новой Зеландии расчет на ветровые воздействия регламентирован документом [110]. «Строительные нормы Австралии и Новой Зеландии / Воздействия на конструкции. Часть 2: Ветровые воздействия». Документ [110] разработан Объединенным обществом стандартизации Австралии и Новой Зеландии в 2002 году. Стандарты [110] содержат детально описанную процедуру определения ветровых нагрузок на сооружения для различных типов зданий, как для менее чувствительных к ветровым нагрузкам, так и конструкций, для которых ветровые воздействия могут стать определяющими.

Нормы [110] распространяются на:

– здания высотой меньше или равной 200 м;

– здания с кровлей менее 100 м. Данный стандарт не предназначен для расчета: –сооружений на торнадо;

–морских платформ, мостов, опор ЛЭП.

Несмотря на множество различных типов зданий и сооружений, описанных в [110], наличие методик расчета для высотных зданий, обладающих повышенной чувствительностью к ветровым нагрузкам, данный стандарт для некоторых случаев рекомендует проводить аэродинамические испытания моделей зданий:

– низкие собственные частоты зданий – менее 0,2 Гц

– высота зданий более 200 м; – очевидна значительная связь в первых трех формах колебаний.

1.4. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОСФЕРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫЕ ОБЪЕКТЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Для проведения классификации требуется выбрать критерии, которые могут носить как количественный, так и качественный характер, а также соотносятся с действующей нормативно-правовой документацией и требованиями паспорта научной специальности (Рисунок 1.28). Техносферную безопасность транспортных систем для удобства и точности моделирования процессов и конструктивных систем объектов транспортной инфраструктуры предлагается представить в виде комплекса, включающего негативные факторы транспортной деятельности с возможностью количественной оценки их влияния на уровень техносферной безопасности (Рисунок 1.29). Для этого в настоящем диссертационном исследовании рассматривается ряд физических, физико-химических процессов и производственных технологий по проектированию, мониторингу и эксплуатации критически важных объектов транспортной инфраструктуры, связанных с опасными факторами транспортной деятельности.



Рисунок 1.27– Составляющие техносферной безопасности



Рисунок 1.28– Техносферная безопасность транспортных систем

Факторы, которые могут рассматриваться в рамках предлагаемых моделей, алгоритмов и подходов могут быть представлены в виде следующей схематической совокупности (Рисунок 1.29), некоторое из них будут подробно рассмотрены в следующих разделах настоящей работы, моделирование и увязка в единую систему всех оставшихся представляется перспективной задачей, которая и отражена в части заключения о будущих возможностях развития данной тематики.



Рисунок 1.29– Факторы, влияющие на техносферную безопасность

Алгоритм создания имитационных, аналитических и физических моделей предлагается начать с блока задания типа критически важного объекта транспортной инфраструктуры, определения типа окружающей местности и застройки, составления перечня происходящих производственных и технологических процессов, совокупности действующих нагрузок и их сочетаний, схемы влияния указанных выше факторов с функциональными критериями частотных, амплитудных характеристик, параметров интенсивности и т.д.

1.5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 1

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. Недоучет подобной нагрузки и аэродинамической неустойчивости требует изучения отдельной группы причин катастрофических процессов.

Установлено, что при проектировании, строительстве и эксплуатации требуется предпринимать меры по снижению риска ветровых, снеговых и гололедно-изморозевых воздействий на различных объектах. В данном разделе представлена основная информация о перечисленных явлениях, в контексте возможностей моделирования с помощью подходов, представленных в следующих разделах.

Обзор литературных источников с результатами испытаний в аэродинамических трубах позволил установить, что реакции сооружения на вихревой резонанс усиливаются по мере того, как ограждения становятся все более заблокированы снегом или льдом.

В разделе сделан обоснованный вывод, что основной проблемой действия наледи и снега становится аэродинамическая устойчивость мостовых переходов, а не увеличение нагрузки от ветра.

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.

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 объекта транспортной инфраструктуры, на основе которой сформулирован подход к оценке таких воздействий и возможных сценариев поведения исследуемого объекта на различных этапах его жизненного цикла.

2. МЕТОДИКА ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЪЕКТЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

2.1. МЕТОДИКА АНАЛИЗА КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ОСНОВАННАЯ НА СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДАХ

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.

Основные методы и результаты первой части данной методики (статистическом анализе экстремальных ветровых воздействий) отражены в работах [98], [126], [190]. Программа построения расширенной розы ветров для статистической обработки информации об экстремальных ветровых воздействиях по данным метеостанций в изыскиваемом регионе, являющаяся неотъемлемой частью данной методики, имеет свидетельство о государственной регистрации программы для 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).

Идея данной методики состоит в анализе экстремальных ветровых воздействий. Ветер можно классифицировать по скорости ветра на слабый (до 5 м/с), средний (5-10 м/с), сильный (10-20 м/с) и ураганный (свыше 20 м/с) [177]. Ветровая нагрузка конкурирует с сейсмической нагрузкой как доминирующая

климатическая нагрузка для конструкций. Они нанесли примерно одинаковый ущерб за длительный период времени, хотя сильные разрушительные землетрясения случаются реже, чем сильные ураганы [148]. Чрезвычайно сильный ветер угрожает безопасности жизни населения: обрывы линий электропередач, срывы крыш зданий, выкорчевывание деревьев, опасные бури на воде и др. [122]. Экстремально сильные ветры наблюдаются на половине территории Российской Федерации.

Для проектирования таких объектов транспортной инфраструктуры, как мостовые конструкции в первую очередь требуется точное и достоверное изучение экстремального распределения ветра [116], [185].

Для объектов, расположенных в прибрежных и горных районах, принципиальное значение имеет распределение экстремальных ветров [138], [174], [180],

Блок-схема данной методики представлена на Рисунок 2.1. Сама методика основана на использовании стандартного статистического критерия хи-квадрат

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}, \quad (2.1)$$

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

При необходимости статистика хи-квадрат рассчитывается с поправкой Йейтса

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(|O_{ij} - E_{ij}| - 0.5)^2}{E_{ij}}. \quad (2.2)$$

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.

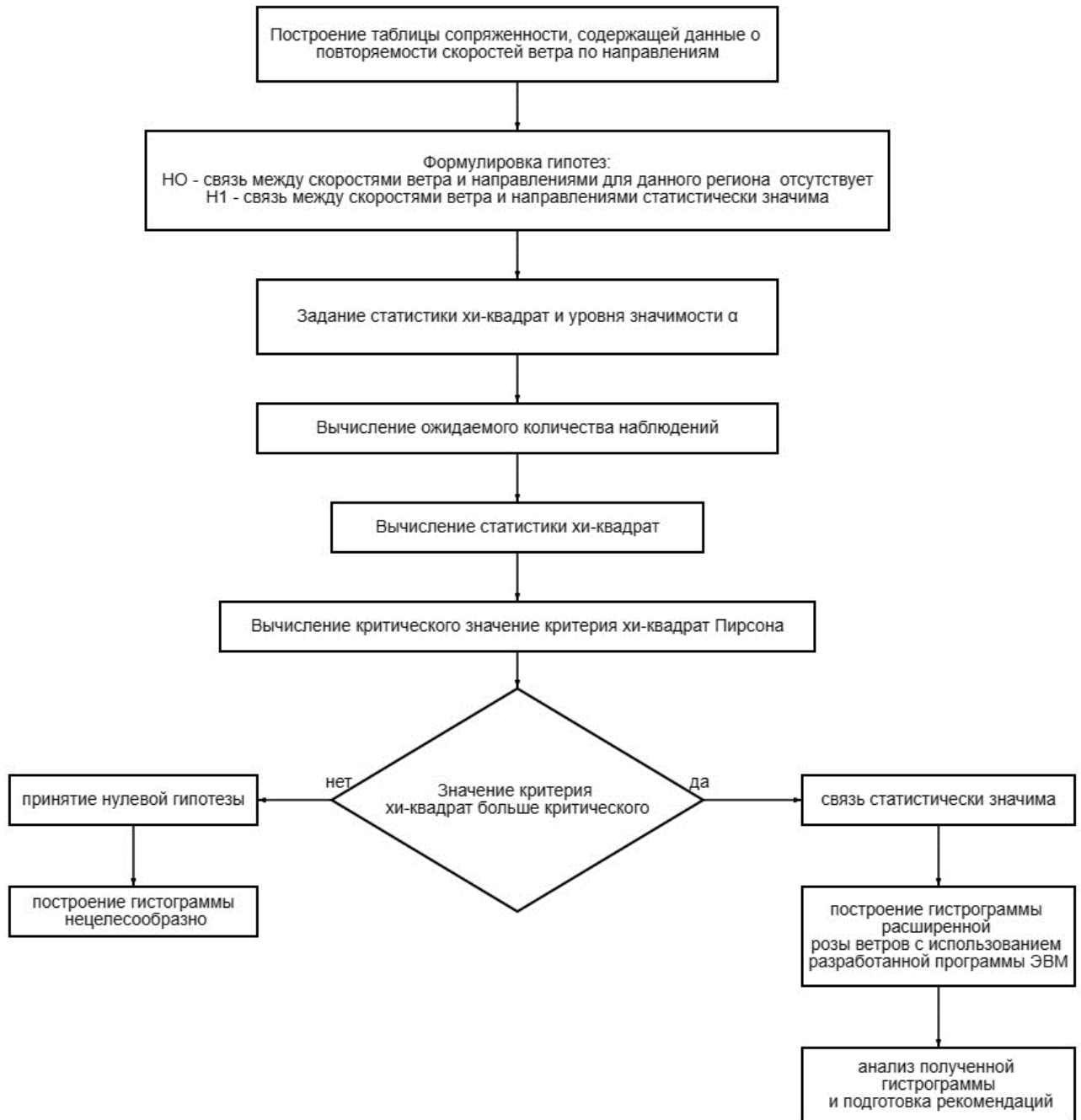


Рисунок 2.1– Схема методики уточнения параметров климатической нагрузки

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 0°C , 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

- 1) Строится таблица сопряженности, содержащая данные (количество дней) о преобладающих направлениях ветра и высоте снежного покрова (Таблица 2.1);

Таблица 2.1– Пример таблицы сопряженности для анализа снеговых воздействий

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

- 2) Формулируется нулевая гипотеза о существовании связи между высотой снежного покрова и направлениями ветра;
- 3) Задается статистика Хи-квадрат и уровень значимости;
- 4) Вычисляются теоретические частоты;
- 5) Вычисляется значение статистики по формулами (2.1) или (2.2);
- 6) Вычисляется критическое значение хи-квадрат для принятого уровня значимости;
- 7) Выполняется проверка гипотезы.

2.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЪЕКТЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

2.2.1. Большепролетные мосты

Настоящий алгоритм устанавливает требования к содержанию и выполнению работ при измерении параметров интегральных ветровых нагрузок и вынужденных колебаний моделей протяженных мостовых конструкций, возникающих под действием ветра при проведении экспериментальных исследований в аэродинамической трубе.

В соответствии с действующими нормативными документами: *«Висячие и вантовые мосты, а также стальные балочные мосты с пролетами более 100 м следует проверять на аэродинамическую устойчивость и пространственную жесткость. Для конструкций с динамическими характеристиками, существенно отличающимися от аналогичных характеристик построенных мостов, кроме аналитических расчетов следует проводить соответствующие исследования на моделях или путем математического моделирования»*.

Исследуемыми параметрами интегральных ветровых нагрузок являются безразмерные аэродинамические коэффициенты аэродинамического сопротивления, подъемной силы и крутящего момента относительно продольной оси. Исследуемыми параметрами вынужденных колебаний являются форма, амплитуда, частота и спектр колебаний.

Измерения данных параметров протяженных мостовых конструкций, возникающих под действием ветра при проведении экспериментальных исследований в аэродинамической трубе, выполняются методом непосредственной оценки на основании проведения физического эксперимента. Применяемый метод измерений предусматривает определение интегральных аэродинамических характеристик с использованием сило-моментных датчиков и параметров вынужденных колебаний с использованием лазерных датчиков перемещения.

Полученные результаты регистрируются в программе «Запись показаний лазерных датчиков перемещения при проведении аэродинамических испытаний» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662706).

Подготовка к проведению испытаний по исследованию интегральных ветровых нагрузок

При подготовке к физическому эксперименту проверить готовность и работоспособность всех составляющих частей аэродинамической трубы (АДТ) в целом, правильность функционирования системы сбора измерительной информации, наличие и доступность к использованию элементов крепления датчиков, координатных устройств, отсутствие посторонних предметов в АДТ и в местах ее обслуживания в период работ по испытаниям.

Общие требования к уменьшенной модели конструкции, соблюдение которых гарантирует корректность соответствия модели реальному объекту в условиях статической постановки исследований:

Наиболее важным при моделировании вышеописанных объектов является полное геометрическое подобие – геометрическое подобие модели реальному объекту по внешнему обтекаемому профилю.

Геометрический масштаб должен быть определен из условий размещения модели в рабочей зоне АДТ, а также условия, что степень загромождения поперечного сечения рабочей части моделью и системой подвесов не должна превышать 10%.

Проведение испытаний

На первом этапе испытаний модели прочно закрепляется винтами к 6-ти компонентным сило-моментным датчикам и проводится измерение подъемной силы, силы лобового сопротивления и аэродинамического момента.

После установки модели в рабочей части, проверки работы всех измерительных систем и считывания «нулевых» показаний датчиков проводятся испытания по определению нижней границы диапазона автомодельности по числу Рейнольдса (наименьшей скорости потока, при которой характер обтекания объекта не зависит от масштаба модели).

Модель подвергаются воздействию ветра, сигналы о колебаниях усилий записываются в течение 1 мин, и затем рассчитываются их средние значения. Эти усилия выражаются в безразмерной форме, которая называется «аэродинамическим коэффициентом», следующим образом:

Коэффициент лобового сопротивления

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U^2 * H * L}, \quad (2.3)$$

Коэффициент подъемной силы

$$C_L = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho U^2 * H * L}, \quad (2.4)$$

Коэффициент крутящего момента

$$C_{mz} = \frac{M_z}{\frac{1}{2}\rho U^2 * B * H * L}, \quad (2.5)$$

где $\frac{1}{2}\rho U^2$ – ветровой напор, измеренный в аэродинамической трубе.

Обработка результатов

Обработка, анализ и оценка результатов измерений включают вычисление значений вышеперечисленных аэродинамических коэффициентов, вычисление ветровой нагрузки, а также проверку возможности возникновения галопирования на основании критерия Глауэрта-Ден-Гартога.

Галопирование может иметь место, если параметр галопирования отрицателен (так называемый критерий Глауэрта-Ден-Гартога – необходимое условие возможности возникновения аэроупругой неустойчивости галопирования):

$$[C'_L(0) + C_D(0)] < 0. \quad (2.6)$$

Если начальное направление ветра не горизонтальное, то приведенный выше критерий может быть обобщен для различных углов атаки.

Подготовка к проведению испытаний по исследованию параметров вынужденных колебаний

При подготовке к физическому эксперименту проверить готовность и работоспособность всех составляющих частей аэродинамической трубы (АДТ) в целом, правильность функционирования системы сбора измерительной информации, наличие и доступность к использованию элементов крепления датчиков, координатных устройств, отсутствие посторонних предметов в АДТ и в местах ее обслуживания в период работ по испытаниям.

В общем случае, амплитуда колебаний протяженной мостовой конструкции под действием ветра является функцией многих параметров, как то: скорость ветра, частота колебаний, погонная масса конструкции, плотность воздуха и т.д.

С использованием анализа размерностей можно составить набор безразмерных параметров, обеспечивающих подобие при физическом моделировании.

Критерий Коши – критерий, характеризующий сжимаемость среды (воздуха):

$$Ca = \frac{EJ}{\rho V^2 L_0^4}, \quad (2.7)$$

где ρ – плотность среды, [кг/м³]; EJ – изгибная жесткость, [Н*м²].

Критерий Ньютона – критерий, характеризующий отношение работы внешних сил к кинетической энергии тела:

$$Nw = \frac{m_e}{\rho L_0^2}, \quad (2.8)$$

где m_e – эквивалентная погонная масса, [кг/м];

Критерий Струхаля – критерий, характеризующий инерционные гидродинамические силы, возникающие при нестационарном движении жидкости:

$$Sh = \frac{f L_0}{V}, \quad (2.9)$$

где f – характерная частота процесса (например, частота образования вихрей), [Гц];

Критерий Скрутона – критерий, характеризующий параметр собственного демпфирования конструкции.

$$Sc = \frac{2m_e \delta}{\rho L_0^2} \quad (2.10)$$

где δ – логарифмический декремент колебаний.

В модели должны быть использованы материалы и способы крепления, достаточные для исключения возможности разрушения или частичной деформации модели под действием ветрового потока при проведении физического эксперимента.

После сборки модели в рабочей части АДТ устанавливается трубка приемника давления для контроля скорости потока [67] и выполняется калибровка измерительной системы.

Калибровка какой-либо измеряемой величины заключается в установлении зависимости между действительным изменением этой величины под действием известной нагрузки и величиной выходного сигнала устройства, которым измеряется эта величина, в виде тарировочного коэффициента. Если зависимость линейная, то коэффициент – число, если нелинейная – это график или функциональная зависимость.

Калибровочный коэффициент перемещений по i -тому направлению (вдоль потока – x , поперек – y) определяется как отношение

$$\varphi_i = \frac{a_{ig}}{a'_{ir}}, \quad (2.11)$$

где a_{ig} – действительное перемещение упругого элемента в i -том направлении при тарировке под действием статической силы Q ; a'_{ir} – перемещение на тарировочной осциллограмме.

Проведение испытаний

Средства измерений (лазерные датчики перемещения) устанавливаются на расстоянии от модели в соответствии с рабочим диапазоном средств измерений.

Все двери АДТ закрываются, в протоколе испытания указывается время и условия начала испытаний.

Производится запуск записи показаний средств измерений.

Запускается работа двигателей АДТ, скорость потока в рабочей зоне устанавливается равной 1 м/с и увеличивается с шагом не более 0,5 м/с вплоть до достижения максимальной скорости эксперимента, с интервалом, равным 2 минутам между шагами.

После записи последних результатов на максимальной скорости эксперимента выполняется отключение работы двигателей АДТ и остановка записи показаний средств измерений.

При возникновении аэродинамической неустойчивости любого типа, кроме вихревого возбуждения, или деформации модели, непредусмотренной условиями эксперимента, в ходе испытания производится немедленная остановка работы двигателей АДТ.

При необходимости после проведения испытания параметры потока в рабочей зоне АДТ могут быть изменены и проведено дополнительное испытание, с соответствующей записью в протокол испытания.

Дополнительно, при наличии на исследуемом мосту ветрозащитных экранов с большой парусностью выполняются испытания по определению распределения аэродинамического коэффициента внешнего давления C_e по поверхности ветрозащитных экранов [67]. Методика проведения испытаний аналогична описанной в разделе 2.2.2

Обработка результатов

Обработка, анализ и оценка результатов измерений включают вычисление амплитуд и частот вынужденных колебаний конструкции модели.

На первом этапе, выполняется проверка характеристик динамических модели. Логарифмический декремент колебаний δ определяется в процессе затухания свободных колебаний исследуемой модели в выбранном направлении по формуле

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{y_i}{y_{i+n}}, \quad (2.12)$$

где y_i , y_{i+n} – i -я и $(i+n)$ -я амплитуды затухающих колебаний, n – число разделяющих периодов ($n=8-10$).

Амплитуда u_i выбирается на 3-4 периодах от начала колебаний. По меткам отметчика времени на осциллограмме определяется частота свободных колебаний f_i модели.

Далее, на основании анализа результатов измерений амплитудно-частотных характеристик выполняется оценка возможности возникновения явлений аэроупругой неустойчивости конструкции для различных углов атаки ветрового потока.

После обработки результаты испытаний необходимо отразить в финальном отчете в табличном и графическом видах.

Отчет должен содержать значения критических скоростей ветра и причины возникновения явлений аэроупругой неустойчивости конструкции, а также значения максимальной амплитуды колебаний в зависимости от скорости набегающего потока.

2.2.2. Вокзалы, аэропорты, канатные дороги, ТПУ и др

В соответствии с ГрК РФ Статья 48.1. К особо опасным и технически сложным объектам относятся в том числе и объекты капитального строительства инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования, объекты инфраструктуры внеуличного транспорта, портовые гидротехнические сооружения, относящиеся к объектам инфраструктуры морского порта, объекты инфраструктуры воздушного транспорта, объекты инфраструктуры воздушного транспорта.

В соответствии с требованиями действующих нормативных документов, которые рассматривались в разделе 1, для данных сооружений, для определения ветровой нагрузки необходимо использовать значения аэродинамических коэффициентов, полученных в результате аэродинамических испытаний в АДТ или на основании опубликованных данных.

В целом методика проведения таких испытаний известна и описана в научно-технической литературе. При этом стоит отметить, что каждый автор (научно-исследовательский центр, лаборатория) описывает методику, адаптированную под конкретную аэродинамическую трубу и измерительное оборудование. Хотя в последнее время нормативные документы расширяются в части рекомендаций по проведению аэродинамических испытаний зданий и сооружений, формализованный алгоритм проведения испытаний и подготовки к ним отсутствует.

Как правило здания вокзалов, ТПУ, терминалы канатных дорог и др. представляют собой уникальные сооружения общественного пользования или специализированные объекты (промышленные, военные и др.).

Для подобных зданий и сооружений учитываются следующие воздействия ветра: основной тип ветровой нагрузки (нагрузка на несущие конструкции); пиковые значения ветровой нагрузки, действующие на конструктивные элементы ограждения и элементы их крепления [91].

Компонентами ветровой нагрузки являются [91]:

- нормальное давление w_p , приложенное к внешней поверхности сооружения или элемента;
- силы трения w_f , направленные по касательной к внешней поверхности и отнесенные к площади ее горизонтальной или вертикальной проекции;
- нормальное давление w_i , приложенное к внутренним поверхностям сооружений с проницаемыми ограждениями с открывающимися или постоянно открытыми проемами;
- проекции w_x и w_y , внешних сил в направлении осей x и y , обусловленных общим сопротивлением сооружения;
- крутящий момент m_z относительно оси z ;
- опрокидывающие моменты m_x , m_y относительно осей x и y .

Соответственно можно выделить основные задачи модельных исследований зданий и сооружений в аэродинамических трубах:

- определение распределения аэродинамического коэффициента внешнего давления C_e по поверхности исследуемого объекта;
- определение интегральных аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления C_x , поперечной силы C_y и крутящего момента C_{mz} .

Алгоритм проведения испытаний по определению распределения аэродинамического коэффициента внешнего давления c_e по поверхности исследуемого объекта

При проведении данного типа испытаний измерительная система, включает в себя дифференциальные датчики давления, для определения давления в контрольных точках на поверхности конструкции. Также вычисляется C_e – аэродинамический коэффициент внешнего давления, для последующего расчета ветровой нагрузки.

Градуировка измерительной системы

Перед началом проведения испытаний необходимо осуществить градуировку используемых датчиков давления. Градуировка выполняется методом проведения «контрольных» испытаний. Контрольные испытания необходимо проводить не раньше, чем за 2 дня до проведения аэродинамических испытаний.

В качестве контрольного прибора измерения давления при проведении градуировки необходимо использовать прибор, включенный в Государственный реестр средств измерений и имеющий действительный сертификат о поверке средства измерения выданный организацией, имеющей аккредитацию на право выполнения работ и (или) оказания услуг по поверке и калибровке средств измерений.

Для проведения контрольных испытаний необходимо соблюдение и фиксация следующих внешних параметров на момент проведения поверки:

- температура воздуха окружающей среды – не ниже 20^0 (фиксация);

- атмосферное давление (фиксация);
- не допускается наличие рядом с поверяемой системой и эталонным оборудованием источников тепла;
- не допускается попадание на поверяемую систему и эталонное оборудование прямых солнечных лучей.
- исключить влияние электромагнитных помех на измерительную систему

В процессе градуировки с использованием специализированного калибратора или иного источника опорного давления на каждый датчик подается давление определенной величины. Диапазон приложенного опорного давления регламентируется техническими характеристиками самого датчика, а также предполагаемым минимальным значением давления измеряемого при проведении моделирования ветрового воздействия в аэродинамической трубе.

Тарировочный коэффициент мгновенного давления определяется по формуле

$$V = \frac{P_0}{q'_T} \quad (2.13)$$

где P_0 – давление в емкости при тарировке; q'_T – амплитуда всплеска давления на тарировочной осциллограмме при сбросе давления из емкости.

Тарировка датчика проводится 10-12 раз при разных давлениях, тарировочный коэффициент осредняется, вычисляется погрешность измерения.

Показания датчиков давления при установившемся нагнетенном давлении в системе, при помощи используемого программного комплекса, сохраняются в табличном виде, в формате «Вольты». Показания контрольного прибора сохраняются в формате Па. При помощи источника опорного давления нагрузка на датчик изменяется в соответствии с предполагаемым минимальным диапазоном измерения с заданным шагом.

Все собранные данные сохраняются в файл формата .xlsx (см. Таблица 2.2)

Таблица 2.2– Пример полученной таблицы поверочных данных

№	Температура, °С	Атм. давление, Па	Эталонный прибор, Па	Датчик №1, V	Датчик №2, V	Датчик №3, V
1						
2						

По результатам градуировки для каждого датчика строится график зависимости показаний поверяемого датчика от показаний контрольного прибора и определяются калибровочные коэффициенты соответствия (сдвиг и отклонение).

Полученные коэффициенты сохраняются в отдельную таблицу и используются при проведении аэродинамических испытаний.

Проведение испытаний

В рамках выполнения подготовительных мероприятий выбираются контрольные точки на поверхности модели, в которых будут проводиться измерения, выполняется нумерация этих точек [67].

В зависимости от условий проведения эксперимента (необходимость определения пульсационной составляющей) и параметров исследуемого объекта выбираются дифференциальные датчики давления, а также схема размещения измерительного оборудования [67]. При определении пульсационной составляющей длина пневмотрассы соединяющей контрольные точки на поверхности модели и используемые датчики не должна превышать 300 мм.

Модель размещается в рабочей зоне аэродинамической установки.

Контрольные дренажные точки на модели силиконовыми трубками соединяются с дифференциальными датчиками давления, подключенными к АЦП, в соответствии с нумерацией. Обратный канал (свободный выход) датчиков соединяется с источником статического давления (трубка Пито-Прандтля).

После сборки модели в рабочей части устанавливается трубка приемника давления для контроля скорости потока и выполнения вычислений

аэродинамических коэффициентов, считываются «нулевые» (при отсутствии потока) показания датчиков [67].

После установки модели в рабочей части, проверки работы всех измерительных систем и считывания «нулевых» показаний датчиков проводятся испытания по определению нижней границы зоны автомодельности по Рейнольдсу (наименьшей скорости потока, при которой характер обтекания объекта не зависит от масштаба модели).

В трубе устанавливается скорость потока, соответствующая условиям проведения эксперимента (определяется на основании проведенного испытания по определению зоны автомодельности). По осциллограмме на экране компьютера определяется момент выхода на режим (поток стационарный и равномерный); считываются показания датчиков давления, а также их осредненные показания; по указанию оператора данные записываются в память компьютера. Затем осуществляется поворот модели в трубе с шагом, соответствующим условиям проведения эксперимента. Для каждого угла считывания показаний датчиков повторяются. Поворот модели осуществляется от 0 до 360° для считывания контрольных показаний и последующего сравнения их с показаниями, снятыми при нулевом положении [67].

По результатам испытаний по определению перепада давления в контрольных точках на поверхности макета вычисляется аэродинамический коэффициент давления в соответствующих точках по следующей формуле [67]:

$$c_e = \frac{2\Delta p_i}{\rho_\infty V_\infty^2} = \frac{2(p_i - p_{ст})}{\rho_\infty V_\infty^2} \quad (2.14)$$

где p_i – измеренное значение в точке, $p_{ст}$ – значение статического давления, V_∞ – скорость набегающего потока, ρ_∞ – плотность потока.

Полученные значения коэффициентов сохраняют в табличной и графической формах в виде зависимости значения коэффициента от угла поворота модели [67].

Дополнительно, в случае необходимости, на основании результатов испытаний проводится оценка возможности возникновения резонансного

вихревого возбуждения. Для этого не требуется моделировать упругие свойства реальной конструкции, а достаточно проанализировать фактические спектры измеренных в эксперименте колебаний ветровой нагрузки на жестко закрепленных макетах корпусов объекта. Пересчет частоты колебаний давления с трубных на натурные условия для нормативного ветра осуществляется в соответствии с правилами теории подобия и размерностей по формуле:

$$f = \frac{f_M}{N} \left(\frac{w_0}{q_{0M}} \right)^{0,5} \quad (2.15)$$

где q_{0M} – значение скоростного напора $q(z_{0M})$, измеренное в неравномерном потоке в аэродинамической трубе на высоте z_{0T} , соответствующей отметке $z = z_0$ для нормативного ветра в натуральных условиях; N – масштаб макета по отношению к натурному зданию.

Резонансное вихревое возбуждение не возникает, если при нормативном ветре дискретные частоты f (Гц) схода вихрей, вызывающих синхронизированную поперечную ветровую нагрузку на фасады натурального здания, меньше, чем значение низшей собственной частоты изгибных колебаний здания f_1 , т.е. $f < f_1$.

Особый интерес представляет исследование спектральных характеристик ветровой нагрузки для зданий и сооружений, в том числе и мостов, в условиях плотной окружающей застройки, так как нормативный подход не учитывает трехмерность обтекания и аэродинамическую интерференцию, влияющие на условия срыва вихрей при обтекании исследуемого объекта.

2.2.3. Мачты освещения, конструкции электрического хозяйства транспортной инфраструктуры и другие решетчатые (ветропроницаемые сооружения)

С точки зрения аэродинамического моделирования, отдельным классом сооружений повышенного уровня ответственности транспортной инфраструктуры, являются решетчатые конструкции. Такие конструкции широко распространены в

электрическом хозяйстве, в инфраструктуре для прокладки кабельных линий связи и т.д.

Данные сооружения не имеют сплошных фасадов и кровельных покрытий, соответственно алгоритм проведения испытаний по определению распределения аэродинамического коэффициента внешнего давления C_e по поверхности исследуемого объекта [67] использовать затруднительно. Необходимо предусматривать прокладку пневмотрассы в тонких конструктивных элементах модели, что существенно увеличивает трудозатраты на ее изготовление. При этом как таковое распределение давления по элементам ветропроницаемой конструкции не требуется, достаточно знать интегральные аэродинамические характеристики, необходимые для расчета ветровой нагрузки в основании конструкции, или, что бывает значительно реже, в ее отдельных узлах. В случае необходимости проведения исследования ветрового воздействия на высотные решетчатые конструкции (высота 200 м) и более, а также конструкции с постоянным поперечным сечением допускается проведение экспериментальных исследований на отсечных (секционных) моделях. В данном случае результаты исследований (безразмерные аэродинамические коэффициенты) можно использовать для расчета ветровой нагрузки как на отдельную секцию, с учетом заданного скоростного напора на высоте ее расположения, так и экстраполировать на сооружение в целом. Кроме того, проведение исследований на отсечных моделях позволяет увеличить масштаб модели и использовать датчики давления для определения нагрузки в отдельных узлах.

Алгоритм проведения испытаний по определению интегральных аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления s_x , поперечной силы s_y и крутящего момента m_z

При проведении данного типа испытаний измерительная система включает в себя сило-моментные датчики, определяются составляющие аэродинамической

силы и момента по осям X, Y и Z. По результатам испытаний по определению сило-моментных характеристик вычисляют аэродинамические коэффициенты по следующим формулам:

$$C_x = \frac{F_x}{q_\infty S}; C_y = \frac{F_y}{q_\infty S}; C_z = \frac{F_z}{q_\infty S}; \quad (2.16)$$

$$C_{Mx} = \frac{F_x}{q_\infty Sl}; C_{My} = \frac{F_y}{q_\infty Sl}; C_{Mz} = \frac{F_z}{q_\infty Sl}; \quad (2.17)$$

где C_x — коэффициент лобового сопротивления; C_y — коэффициент поперечной силы; C_{Mz} — коэффициент крутящего момента; q_∞ — скоростной напор; S — характерная площадь мишени модели; l — плечо в заданной системе координат.

Силы и моменты измеряются относительно нулевой точки сило-моментного датчика.

Градуировка измерительной системы

Перед началом проведения испытаний необходимо осуществить градуировку используемых сило-моментных датчиков. Градуировка выполняется методом проведения «контрольных» испытаний. Контрольные испытания необходимо проводить не раньше, чем за 2 дня до проведения аэродинамических испытаний.

В качестве контрольного оборудования при проведении градуировки необходимо использовать оборудование, включенное в Государственный реестр средств измерений и имеющее действительный сертификат о поверке средства измерения выданный организацией, имеющей аккредитацию на право выполнения работ и (или) оказания услуг по поверке и калибровке средств измерений. Рекомендуется в качестве контрольного приспособления для приложения нагрузки использовать комплект гирь, класса E2, диапазоном веса от 10 г до 10 кг.

Для проведения контрольных испытаний необходимо соблюдение и фиксация следующих внешних параметров на момент проведения поверки:

- температура воздуха окружающей среды – не ниже 20⁰ (фиксация);
- атмосферное давление (фиксация);
- не допускается наличие рядом с поверяемой системой и эталонным оборудованием источников тепла;

В процессе градуировки при помощи гирь через подвесную систему к сило-моментному датчику прикладывается нагрузка определенной величины (минимальный диапазон измерения).

Показания весов при установившейся приложенной к ним нагрузке при помощи управляющего программного комплекса сохраняются в формате H. Величина контрольной нагрузки фиксируется в соответствующей графе в отчете о проведении градуировки.

При помощи набора гирь, нагрузка на весы изменяется в соответствии с методикой градуировки (минимальный диапазон измерений) с заданным шагом.

Проведение испытаний

В рамках выполнения подготовительных мероприятий выбирается контрольная точка макета, относительно которой будут проводиться измерения.

Выбор модели сило-моментного датчика осуществляется в соответствии с массой макета и предварительным расчетом максимально возможной нагрузки.

При установке макета в рабочую зону аэродинамической трубы необходимо предусмотреть зазор 1-2 мм между исследуемым объектом и не участвующими в определении нагрузки элементами окружающей застройки, для отсутствия касаний.

После установки макета в рабочей части устанавливают трубку приемника давления для контроля скорости потока и выполнения вычислений аэродинамических коэффициентов [67].

После завершения подготовительных операций на измерительную систему подается напряжение и считываются «нулевые» (при отсутствии потока) показания сило-моментного датчика, что необходимо для учета величины начального смещения вследствие нагружения датчика весом конструкции макета [67].

В трубе устанавливают скорость потока, соответствующую условиям проведения эксперимента, и включают протокол регистрации данных. В течение заданного времени показания сило-моментного датчика считываются и записываются два файла: показания нагрузок с частотой 1000 Гц и осредненные

показания нагрузок за весь период работы, записывающей программы. Файл нагрузок в дальнейшем будет использоваться для спектрального анализа регулярных изменений нагрузки в потоке [67].

Поворот модели в трубе осуществляется с шагом, соответствующим условиям проведения эксперимента. Для каждого угла повторяют считывание показаний сило-моментного датчика. Поворот модели осуществляется до 360° для считывания контрольных показаний и последующего сравнения их с показаниями, снятыми при нулевом положении.

По результатам испытаний по определению сило-моментных характеристик вычисляют аэродинамические коэффициенты по формулам (2.16) и (2.17).

Полученные значения коэффициентов сохраняют в табличной и графической формах в виде зависимости значения коэффициента от угла поворота модели [67].

2.2.4. Методика оценки возможности возникновения резонансного вихревого возбуждения на объектах транспортной инфраструктуры

В работе предлагается метод оценки возможности возникновения аэроупругой неустойчивости типа вихревой резонанс, основанный на изучении потока за моделью.

Изготовление динамически подобной модели решетчатой конструкции является чрезвычайно трудоемким процессом и имеет ряд существенных недостатков [66]:

- Высокая стоимость и значительные сроки исследований ввиду трудоемкости изготовления модели;
- Требуется соблюдения одновременно целого ряда фундаментальных критериев подобия, что чрезвычайно затруднительно, а в большинстве случаев – невозможно;

- Низкая точность получаемой научной информации о фактических критериях возникновения и условиях существования явлений аэроупругой неустойчивости;
- Невозможность варьировать основные (массовые, жесткостные и пр.) характеристики модели при возможных конструктивных изменениях объекта.

Таким образом, целесообразно проведение исследований на жестких геометрически подобных моделях, анализ возможности возникновения резонансного вихревого возбуждения выполняется на основании оценки спектральной характеристики колебаний измерительного стенда, который содержит частоты колебаний интегральной ветровой нагрузки на модели, а также частоты колебаний срывного потока за моделью.

На пульсационное изменение давления в ближнем аэродинамическом следе за осциллирующей моделью накладываются случайные турбулентные пульсации давления. Поэтому давление в следе измеряется следующим образом.

Сначала определяется среднее значение (математическое ожидание) мгновенных случайных пульсаций давления

$$\mu = \sum_{i=1}^n \frac{q'_{ip}}{n}, \quad (2.18)$$

где q'_{ip} – амплитуда мгновенного давления на рабочей осциллограмме.

Затем, зная тарировочный коэффициент мгновенного давления, находим пульсационное давление

$$P = V\mu. \quad (2.19)$$

Отнеся его к скоростному напору q ,

$$\bar{q} = \frac{P}{q} \quad (2.20)$$

определяем относительное пульсационное давление в следе.

Данный метод не требует изготовления динамически подобной модели, что существенно облегчает проведение исследования. На основании анализа колебаний интегральной ветровой нагрузки за моделью, а также колебаний

срывного потока за моделью устанавливается возможность вихревого резонансного возбуждения.

2.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЕГОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЪЕКТЫ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

2.3.1. Обоснование

Методика определения снеговой нагрузки основывается на предположении, что отложение снега на поверхности кровли происходит вследствие атмосферных осадков и дальнейшего ветрового переноса снега.

Выпавший снег покрывает кровлю равномерным слоем, толщиной, эквивалентной слою на равнинной поверхности. Во время снегопада возможно сползание снега с наклонных поверхностей кровли, что приводит к формированию снежных мешков вблизи от этих конструктивных особенностей кровли. Вследствие воздействия ветра происходит перераспределение снежных отложений, которые формируют основную картину снегоотложений.

Под воздействием ветра происходит перенос частиц снега. Неравномерность структуры ветрового потока над кровлей определяет картину снегоотложений. Конструктивные особенности формы поверхности кровли приводят к формированию областей с пониженной скоростью ветра и зон, в которых ветер настолько силен, что частицы снега отрываются от поверхности снежного покрова и переносятся вдоль кровли или сносятся за пределы кровли. Существуют исследования, определяющие скорость ветра, при которой снег срывается с поверхности снежного покрова и переносится ветровым потоком. Известно, что при снижении скорости ветра поднятый снег вновь выпадает на кровлю и формируется неравномерный слой снегоотложений. При заданном направлении ветра над кровлей формируется определенная вихревая структура, которая однозначно

определяет картину перераспределения снеговых отложений. Смена направления ветра изменяет картину ветровых потоков над кровлей и приводит к формированию новых зон с повышенным снегоотложением. В холодный период года, когда в данной местности выпадают атмосферные осадки в виде снега, случайным образом меняется интенсивность снегопада, меняется направление ветра и в результате невозможно предсказать какая форма снеговых отложений ожидается в предстоящую зиму. Случайный характер атмосферного воздействия на строительную конструкцию требует назначать величину нагрузки с определенным запасом. В тоже время, в конструкции кровли могут быть элементы, которые формируют такие ветровые структуры, что здесь снежный покров не задерживается и позволяет назначать снеговую нагрузку с понижающим коэффициентом.

Для моделирования снегопереноса разные авторы используют различные материалы. Общим свойством модельного материала является возможность перемещения его по поверхности кровли под воздействием ветрового потока. Во время моделирования снегоотложений назначают скорость потока, при которой наблюдается подъем частиц модельного порошка из выпавшего на поверхность слоя и дальнейший перенос вдоль поверхности.

При выборе модельного порошка обосновано желание моделировать микроструктуру отдельных снежинок. Удержание модельного порошка на поверхности исследуемой кровли должно быть идентичным натурным условиям. При этом диапазон изменения физических параметров натурального снега столь широк, что основным свойством модельного порошка становится возможность его перемещения под воздействием ветровых потоков. Таким образом, для идентичных конструкций кровли следует ожидать идентичных форм снегоотложений при заданном направлении ветра. Этот критерий можно рассматривать как параметр сравнения результатов модельного эксперимента, выполненного в разных аэродинамических трубах. По результатам круговых продувок с определенным шагом по углу атаки моделируется снеговая нагрузка на кровлю. При назначении снеговой нагрузки учитывается преобладающее направление ветра, определенное

в соответствии с изложенной выше методикой. На поверхности кровли могут присутствовать конструктивные элементы, которые можно интерпретировать как стандартные формы, отраженные в строительных нормативах. При назначении снеговой нагрузки выявляют «стандартные» элементы и выполняют проверку полученных результатов назначенной нагрузки с рекомендациями норматива.

2.3.2. Методика моделирования снегоотложений

В качестве модельного материала используется древесная мука, изготовленная в соответствии с ГОСТ 16361—87. Влажность древесной муки в эксперименте не более 8%, размер частиц 0,2мм.

Процесс экспериментального исследования снегопереноса выполняется в три этапа:

- Нанесение равномерного тонкого слоя древесной муки на кровлю объекта.
- Обдув модели ветровым потоком на скорости, когда частицы порошка начинают срываться с поверхности кровли. Обычно скорость 2 – 5 м/сек. Экспозиция в течение достаточного времени до момента, когда существенный перенос модельного порошка не прекратится.
- Повышение скорости потока на 2 -3 м/сек на несколько секунд и прекращение продувки.

По окончании продувки выполняется фотофиксация результатов модельного снегопереноса. Поверхность модели очищается и модель поворачивается на другой угол атаки. Эксперимент повторяется. Количество углов, на которых выполняется продувка, регламентируется техническим заданием. В некоторых случаях продувка выполняется с подробным шагом в случае возможной интерференции обтекания с другими строениями.

По результатам выполненного эксперимента, а также инженерного анализа нормативных схем распределения снеговой нагрузки, представляющих более

консервативный подход, основанный на натуральных наблюдениях, выполняется назначение снеговой нагрузки 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.

2.4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 2

В данном разделе представлена методика моделирования климатических воздействий на различные объекты транспортной инфраструктуры, основанная на экспериментальных исследованиях с учетом ветровой, снеговой, гололедной нагрузки, воздействия агрессивных сред, включающий теоретико-экспериментальное моделирование и создание физических макетных образцов для проведения натуральных экспериментов. Методика включает статистический анализ климатических воздействий для получения дополнительных статистических данных о климатических воздействиях, необходимых для предварительного климатического анализа района строительства объекта транспортной инфраструктуры. Методика состоит из статистического анализа экстремальных ветровых воздействий и дополнительном статистическом анализе высоты снежного покрова, основанных на анализе двумерных частотных распределений с использованием статистики хи-квадрат.

Описанный подход позволяет оптимизировать и существенно уменьшить время подготовки и трудозатраты на проведение эксперимента на 10-15%.

В главе подробно описана схема проведения подготовительных мероприятий, согласно которой выбираются контрольные точки на поверхности макета, относительно которых будут проводиться измерения, модель сило-моментного датчика, с учетом массы макета и предварительным расчетом максимально

возможной нагрузки. После завершения подготовительных операций на измерительную систему подается напряжение и считываются «нулевые» показания датчиков, что необходимо для учета величины начального смещения.

В течение заданного времени проведения эксперимента показания датчиков считываются и записываются два файла: показания нагрузок с частотой 1000 Гц и осредненные показания нагрузок за весь период работы, записывающей программы. Файл нагрузок в дальнейшем будет использоваться для спектрального анализа регулярных изменений нагрузки в потоке.

Для моделирования снеготранспорта в работе предложено использование модельного материала, для которого оценивается возможность его перемещения по поверхности макетной модели. Удержание модельного порошка на поверхности исследуемой кровли должно быть идентичным натурным условиям. По результатам выполненного эксперимента, а также инженерного анализа нормативных схем распределения снеговой нагрузки, выполняется назначение снеговой нагрузки с учетом преобладающих направлений ветра в районе строительства.

Методика 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 искомым характеристик уменьшается в 2-4 раза.

3. 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

3.1. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

3.1.1. Апробация методики анализа экстремальных ветровых воздействий

В качестве региона изыскания выберем г. Владивосток (Дальний Восток РФ).

В Таблица 3.1 представлены наблюдаемые частоты скоростей ветра по направлениям (данные метеостанции в районе строительства за десятилетний период).

Таблица 3.1– Наблюдаемые частоты скоростей ветра по направлениям

V, m/s	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WS W	W	WNW	NW	NNW	W	Total
10	347	23	7	4	11	26	196	419	219	56	30	60	28	60	86	247	1819
11	420	27	7	5	6	25	284	501	236	56	28	43	20	43	125	309	2135
12	387	23	3	3	7	18	275	399	153	41	26	43	27	43	115	334	1897
13	368	22	4	3	6	13	207	326	141	38	17	48	18	48	101	344	1704
14	490	23	6	2	8	14	220	336	121	25	26	37	20	37	147	471	1983
15	246	14	3	1	4	8	87	140	48	12	6	24	7	24	78	195	897
16	235	9	2	3	2	8	87	155	35	14	6	24	12	24	79	246	941
17	182	3	2	1	1	11	71	105	28	5	3	23	8	23	86	215	767
18	171	3	0	0	1	8	77	63	31	3	3	21	7	21	80	167	656
19	123	1	0	1	2	7	62	72	22	5	0	20	5	20	58	166	564
20	68	2	1	0	2	4	39	29	4	2	0	10	3	10	34	75	283
21	83	2	1	0	0	5	29	26	4	2	0	9	1	9	31	93	295
22	54	0	0	0	0	2	29	16	7	1	2	6	2	6	18	69	212
23	45	0	0	0	0	4	20	17	1	1	0	3	0	3	15	42	151
24	38	0	0	1	0	3	17	19	3	2	0	1	1	1	15	48	149
25	17	1	0	1	0	1	10	6	2	0	0	2	0	2	4	21	67
26	12	1	0	0	0	0	12	4	2	2	0	0	0	0	2	18	53
27	6	0	1	0	0	0	3	2	2	0	0	1			1	11	27
28	7	0	0	0	0	0	2	4	0	0	0					15	28
29	3	0	0	0	0	0	2	8	0	0	0					8	21

30	3	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0					7	15
31	1	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0					2	6
32	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0					3	6
33	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0					2	7
34	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0					1	2
Total	3306	154	37	25	50	157	1734	2657	1061	265	147	375	159	374	1075	3109	14685

Как видно из Таблица 3.1, на Дальнем Востоке экстремальные ветровые воздействия реализуются часто.

Таблица 3.2– Теоретические частоты скоростей ветра по направлениям

V, m/s	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WN W	NW	NNW	W	Total
10	409,50 73	19,075 66	4,5831 12	3,0966 97	6,1933 95	19,447 26	214,78 69	329,11 7	131,42 38	32,824 99	18,208 58	46,450 46	19,694 99	46,326 59	133,15 8	385,10 53	1819
11	480,64 75996	22,389 51	5,3792 99	3,6346 61	7,2693 22	22,825 67	252,10 01	386,29 18	154,25 5	38,527 41	21,371 81	54,519 92	23,116 45	54,374 53	156,29 04	452,00 65	2135
12	427,06 72	19,893 63	4,7796 39	3,2294 86	6,4589 72	20,281 17	223,99 71	343,22 18	137,05 94	34,232 55	18,989 38	48,442 29	20,539 53	48,313 11	138,86 79	401,61 89	1897
13	383,61 76	17,869 66	4,2933 61	2,9009 19	5,8018 39	18,217 77	201,20 78	308,30 98	123,11 5	30,749 74	17,057 41	43,513 79	18,449 85	43,397 75	124,73 95	360,75 83	1704
14	446,42 82	20,795 51	4,9963 23	3,3758 94	6,7517 88	21,200 61	234,15 2	358,79 29	143,27 29	35,784 47	19,850 26	50,638 41	21,470 68	50,503 37	145,16 34	419,82 61	1983
15	201,93 95	9,4067 42	2,2600 61	1,5270 68	3,0541 37	9,5899 9	105,91 75	162,29 68	64,808 78	16,186 93	8,9791 62	22,906 03	9,7121 55	22,844 94	65,663 94	189,90 62	897
16	211,84 51	9,8681 65	2,3709 23	1,6019 75	3,2039 5	10,060 4	111,11 3	170,25 79	67,987 81	16,980 93	9,4196 12	24,029 62	10,188 56	23,965 54	68,884 92	199,22 16	941
17	172,67 29	8,0434 46	1,9325 16	1,3057 54	2,6115 08	8,2001 36	90,567 11	138,77 56	55,416 21	13,840 99	7,6778 35	19,586 31	8,3045 97	19,534 08	56,147 43	162,38 36	767
18	147,68 38	6,8794 01	1,6528 43	1,1167 86	2,2335 72	7,0134 15	77,460 27	118,69 2	47,396 39	11,837 93	6,5667 01	16,751 79	7,1027 58	16,707 12	48,021 79	138,88 35	656
19	126,97 2	5,9146 07	1,4210 42	0,9601 63	1,9203 27	6,0298 26	66,596 94	102,04 62	40,749 34	10,177 73	5,6457 61	14,402 45	6,1066 39	14,364 04	41,287 03	119,40 59	564
20	63,711 13	2,9677 9	0,7130 41	0,4817 84	0,9635 68	3,0256 04	33,416 55	51,204 02	20,446 92	5,1069 12	2,8328 91	7,2267 62	3,0641 47	7,2074 91	20,716 72	59,914 67	283
21	66,412 67	3,0936 33	0,7432 75	0,5022 13	1,0044 26	3,1538 99	34,833 5	53,375 21	21,313 93	5,3234 59	2,9530 13	7,5331 97	3,1940 76	7,5131 09	21,595 17	62,455 23	295
22	47,727 07	2,2232 21	0,5341 5	0,3609 12	0,7218 25	2,2665 3	25,032 89	38,357 78	15,317 13	3,8256 72	2,1221 65	5,4136 87	2,2954 03	5,3992 51	15,519 24	44,883 08	212
23	33,994 28	1,5835 21	0,3804 56	0,2570 65	0,5141 3	1,6143 68	17,830 03	27,320 87	10,909 84	2,7248 89	1,5115 42	3,8559 75	1,6349 34	3,8456 93	11,053 8	31,968 61	151
24	33,544 02	1,5625 47	0,3754 17	0,2536 6	0,5073 2	1,5929 86	17,593 87	26,959 01	10,765 34	2,6887 98	1,4915 22	3,8049 03	1,6132 79	3,7947 57	10,907 39	31,545 18	149
25	15,083 55	0,7026 22	0,1688 12	0,1140 62	0,2281 24	0,7163 09	7,9113 38	12,122 51	4,8407 9	1,2090 57	0,6706 84	1,7109 3	0,7254 34	1,7063 67	4,9046 65	14,184 75	67
26	11,931 77	0,5558 05	0,1335 38	0,0902 28	0,1804 56	0,5666 33	6,2582 23	9,5894 45	3,8292 82	0,9564 18	0,5305 41	1,3534 22	0,5738 51	1,3498 13	3,8798 09	11,220 77	53
27	6,0784 47	0,2831 46	0,0680 29	0,0459 65	0,0919 31	0,2886 62	3,1881 51	4,8851 89	1,9507 66	0,4872 32	0,2702 76	0,6894 79	0,2923 39	0,6876 4	1,9765 07	5,7162 41	27
28	6,3035 75	0,2936 33	0,0705 48	0,0476 68	0,0953 35	0,2993 53	3,3062 31	5,0661 22	2,0230 17	0,5052 77	0,2802 86	0,7150 15	0,3031 66	0,7131 09	2,0497 11	5,9279 54	28
29	4,7276 81	0,2202 25	0,0529 11	0,0357 51	0,0715 02	0,2245 15	2,4796 73	3,7995 91	1,5172 63	0,3789 58	0,2102 15	0,5362 61	0,2273 75	0,5348 31	1,5372 83	4,4459 65	21
30	3,3769 15	0,1573 03	0,0377 94	0,0255 36	0,0510 73	0,1603 68	1,7711 95	2,7139 94	1,0837 59	0,2706 84	0,1501 53	0,3830 44	0,1624 11	0,3820 22	1,0980 59	3,1756 89	15
31	1,3507 66	0,0629 21	0,0151 17	0,0102 15	0,0204 29	0,0641 47	0,7084 78	1,0855 98	0,4335 04	0,1082 74	0,0600 61	0,1532 18	0,0649 64	0,1528 09	0,4392 24	1,2702 76	6
32	1,3507 66	0,0629 21	0,0151 17	0,0102 15	0,0204 29	0,0641 47	0,7084 78	1,0855 98	0,4335 04	0,1082 74	0,0600 61	0,1532 18	0,0649 64	0,1528 09	0,4392 24	1,2702 76	6

33	1,5758 94	0,0734 08	0,0176 37	0,0119 17	0,0238 34	0,0748 38	0,8265 58	1,2665 3	0,5057 54	0,1263 19	0,0700 72	0,1787 54	0,0757 92	0,1782 77	0,5124 28	1,4819 88	7
34	0,4502 55	0,0209 74	0,0050 39	0,0034 05	0,0068 1	0,0213 82	0,2361 59	0,3618 66	0,1445 91	0,0360 2	0,0200 73	0,0510 73	0,0216 55	0,0509 36	0,1464 08	0,4234 25	2
Total	3306	154	37	25	50	157	1734	2657	1061	265	147	375	159	374	1075	3109	14685

Статистика хи-квадрат с поправкой Йейтса по формуле (2.2)

$$\chi^2 = 1,38 * 10^8. \quad (3.1)$$

Степень свободы вычисляется как

$$f = (25 - 1)(16 - 1) = 360 \quad (3.2)$$

Вычисляется критическая область хи-квадрат для принятого уровня значимости $\alpha=0,05$ со степенью свободы 360:

$$\chi^2(0,05; 360) > 405. \quad (3.3)$$

Существует статистически преобладающие направления ветров для сильных и экстремальных скоростей.

На следующем шаге строится расширенная роза ветров с использованием специально разработанной программы (Рисунок 3.1).

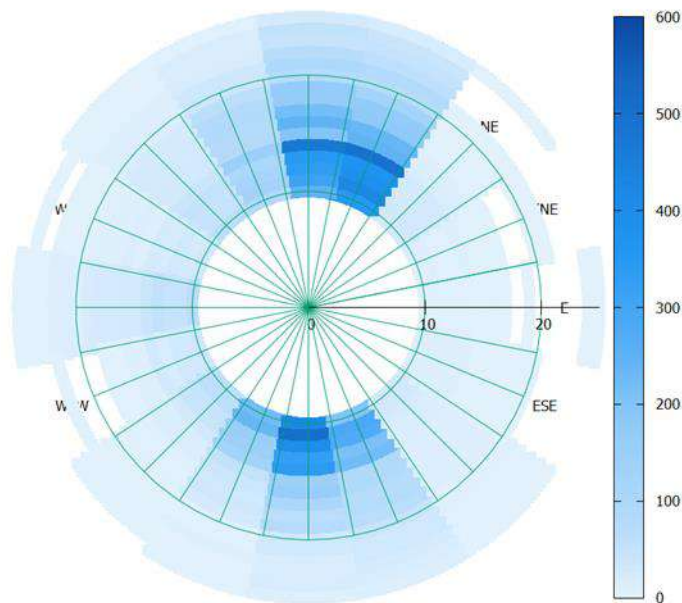


Рисунок 3.1– Расширенная роза ветров (Владивосток)

Если поместить теоретический объект (Рисунок 3.2) в рассматриваемый регион, то углы атаки $\pm 10^\circ$ и $180^\circ \pm 10^\circ$ реализуются на самых неблагоприятных направлениях ветра, такая ориентация моста настоятельно не рекомендуется.

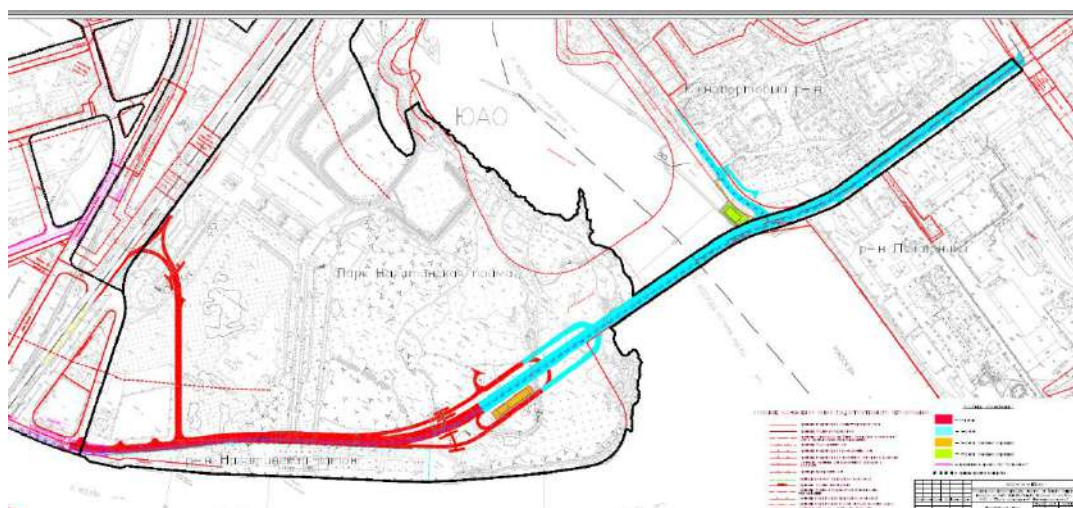


Рисунок 3.2– Ситуационный план

3.1.2. Апробация методики анализа снеговых воздействий

Было исследовано два региона РФ: г. Москва и г. Петропавловск-Камчатский. На основании данных за трехлетний период, полученных из открытых источников (ВНИИГМИ-МЦД, gismeteo), строится таблица сопряженности высоты снежного покрова и преобладающих направлений ветра.

Таблица 3.3– Таблица сопряженности высоты снежного покрова и преобладающих направлений ветра (наблюдаемые для г. Москвы)

Высота снежного покрова	с	сз	з	юз	ю	юв	в	св	Ш	Всего
1-5	1	12	27	13	8	3		0	9	73
6-10	3	7	13	10	6	6	4	1	2	52
11-15	4	1	6	0	1	7	3	4	1	27
16-20	10	3	7	3	2	3	0	3	3	34
21-25	1	4	5	3	3	6	2	1	8	33
26-30	1	4	4	1	5	4	1	0	2	22
31-35	5	4	2	4	0	2	1	1	4	23
36-40	3	4	5	3	1	1	1	3	4	25
41-45	1	3	4	1	3	2	2	2	1	19
46-50	2	4	2	0	3	3	0	0	5	19
51-55	0	0	1	1	2	0	0	2	2	8
55-60	2	2	1	0	0	0	0	0	1	6

131-140			1							1
---------	--	--	---	--	--	--	--	--	--	---

Таблица 3.6– Таблица сопряженности высоты снежного покрова и преобладающих направлений ветра (теоретические для г. Петропавловск-Камчатский)

Высота снежного покрова	с	сз	з	юз	ю	юв	в	св	ш	Всего
0-10	7,247525	21,38614	12,71287	2,732673	5,227723	4,158416	3,80198	1,188119	1,544554	60
11-20	5,194059	15,32673	9,110891	1,958416	3,746535	2,980198	2,724752	0,851485	1,106931	43
21-30	3,261386	9,623762	5,720792	1,229703	2,352475	1,871287	1,710891	0,534653	0,69505	27
31-40	1,449505	4,277228	2,542574	0,546535	1,045545	0,831683	0,760396	0,237624	0,308911	12
41-50	1,328713	3,920792	2,330693	0,50099	0,958416	0,762376	0,69703	0,217822	0,283168	11
51-60	4,106931	12,11881	7,20396	1,548515	2,962376	2,356436	2,154455	0,673267	0,875248	34
61-70	7,851485	23,16832	13,77228	2,960396	5,663366	4,50495	4,118812	1,287129	1,673267	65
71-80	12,68317	37,42574	22,24752	4,782178	9,148515	7,277228	6,653465	2,079208	2,70297	105
81-90	7,972277	23,52475	13,98416	3,005941	5,750495	4,574257	4,182178	1,306931	1,69901	66
91-100	6,40198	18,89109	11,2297	2,413861	4,617822	3,673267	3,358416	1,049505	1,364356	53
101-110	1,570297	4,633663	2,754455	0,592079	1,132673	0,90099	0,823762	0,257426	0,334653	13
111-120	1,570297	4,633663	2,754455	0,592079	1,132673	0,90099	0,823762	0,257426	0,334653	13
121-130	0,241584	0,712871	0,423762	0,091089	0,174257	0,138614	0,126733	0,039604	0,051485	2
131-140	0,120792	0,356436	0,211881	0,045545	0,087129	0,069307	0,063366	0,019802	0,025743	1

На основании Таблица 3.5 и Таблица 3.6 вычисляется статистика хи-квадрат с поправкой Йейтса по формуле (2.2)

$$\chi^2 = 153,7868394. \quad (3.6)$$

Критическая область хи-квадрат для принятого уровня значимости $\alpha=0,05$ со степенью свободы 104:

$$\chi^2(0,05; 104) > 128,8039079. \quad (3.7)$$

Вычисленное значение статистики попадает в критическую область, следовательно, для г. Петропавловск-Камчатский 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, а преобладающие направления ветра должны быть учтены при построении схем снегоотложений для данного объекта в изыскиваемом регионе.

3.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ ЛАНДШАФТНОГО ТИПА НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И МОНТАЖА

В настоящем разделе приведены исследования аэродинамической устойчивости различных типов пролетных строений мостовых переходов – с одной, двумя, тремя и четырьмя главными балками.

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

Исследование аэродинамической устойчивости пролетного строения в условиях плотной городской застройки. Оценка влияния существующего путепровода на проектируемый (Модель 1);

Исследование аэродинамической устойчивости моста с двумя параллельными пролетными строениями, расположенными в непосредственной близости друг от друга. Оценка возможности возникновения бафтинга (Модель 2);

Исследование влияния орографии и угла скольжения на аэродинамическую устойчивость пролетного строения (Модель 3).

3.2.1. Разработка экспериментальных моделей мостовых конструкций разных типов для проведения динамических исследований

Исследование аэродинамической устойчивости пролетного строения в условиях плотной городской застройки. Оценка влияния существующего путепровода на проектируемый (Модель 1)

Балочное пролетное строение с одной главной балкой, длина максимального пролета 110 м, полная ширина пролетного строения – 12,40 м. Поперечное сечение пролетного строения приведено на Рисунок 3.3.

В качестве начального значения логарифмического декремента затухания конструкции принято $\delta=0,02$ – минимальное значение, регламентированное нормативными документами характерное для стальных мостов и мачт решетчатой конструкции со сварными соединениями, а также для мостов из алюминиевых сплавов.

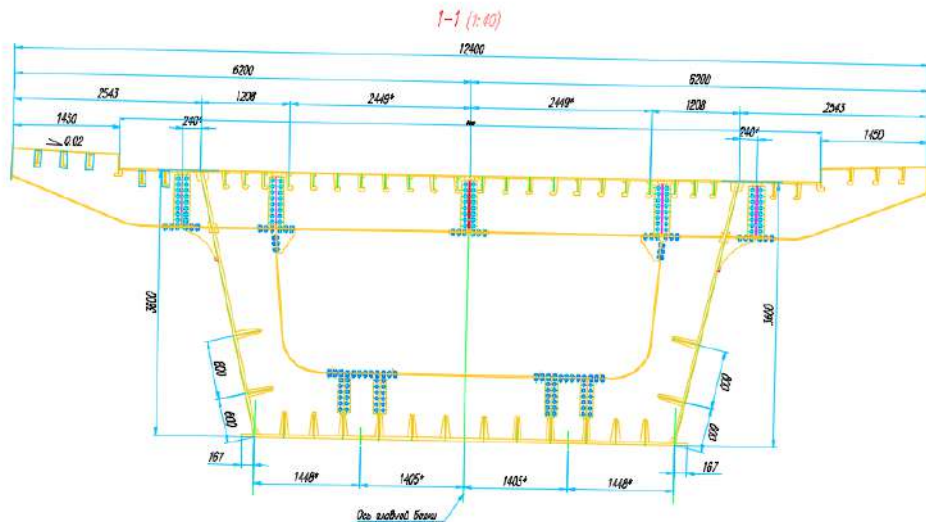


Рисунок 3.3– Схема поперечного сечения моста (Модель №1)

Учитывая размеры сечения рабочей части аэродинамической трубы (4 x 2.5 м), был выбран оптимальный из условий загромождения потока масштаб модели 1:40. В качестве материала для изготовления модели выбран листовой алюминий,

чтобы обеспечить высокую точность геометрического подобия, легкость и высокую жесткость. Мелкие детали выполнены из пластика и оргстекла.

Длина модели фрагмента пролетного строения составляет 1900 мм, ширина пролетного строения - 310 мм. Конструкция модели в совокупности с подобранным материалом обеспечивает не только геометрическое подобие, но и правильное распределение масс, соответствующее натурному объекту. Таким образом, геометрические места центров масс модели и натурного объекта так же соответствуют.

С учетом возможности резки, сгибания, сварки и склеивания материалов, конструкция модели была реализована по следующей схеме (Рисунок 3.4– Рисунок 3.7).

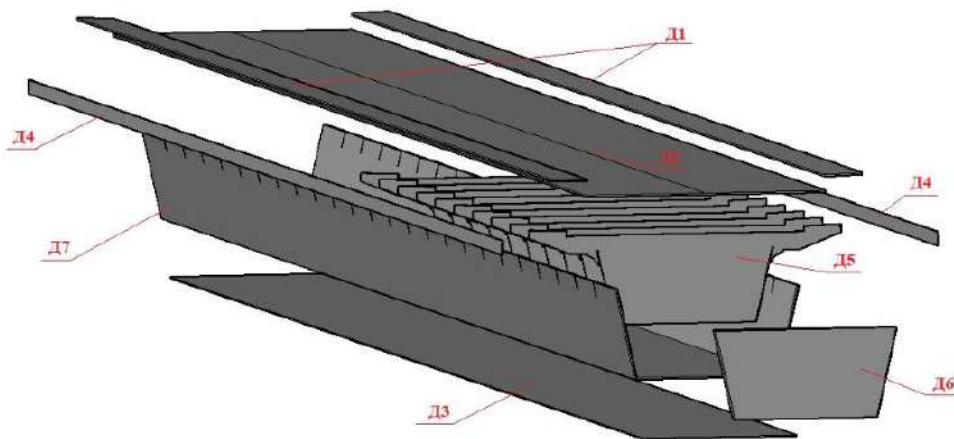


Рисунок 3.4– Схема сборки пролетного строения (шаг 1)

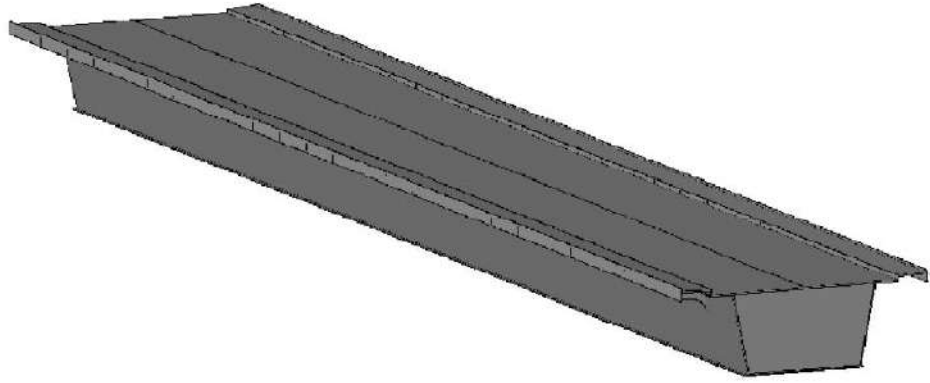


Рисунок 3.5– Схема сборки пролетного строения (шаг 2)

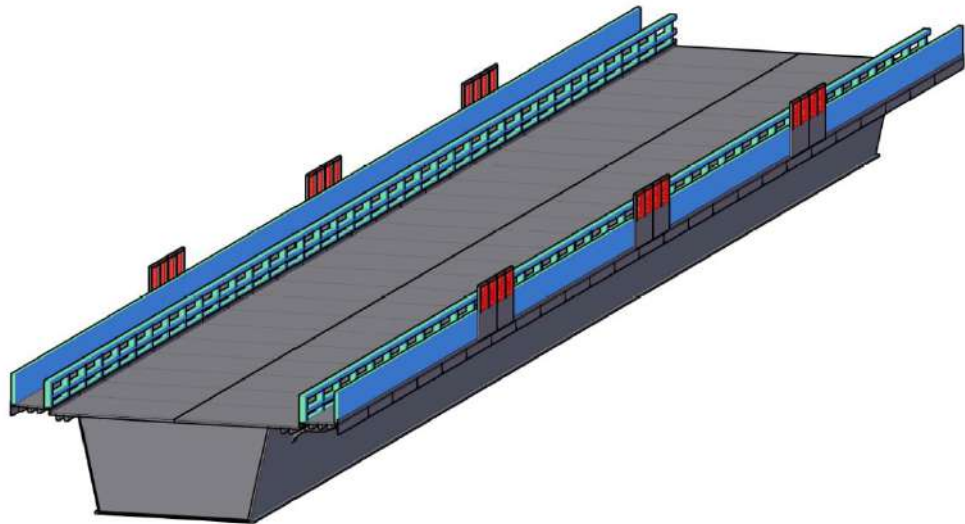


Рисунок 3.6– Схема сборки пролетного строения (шаг 3)

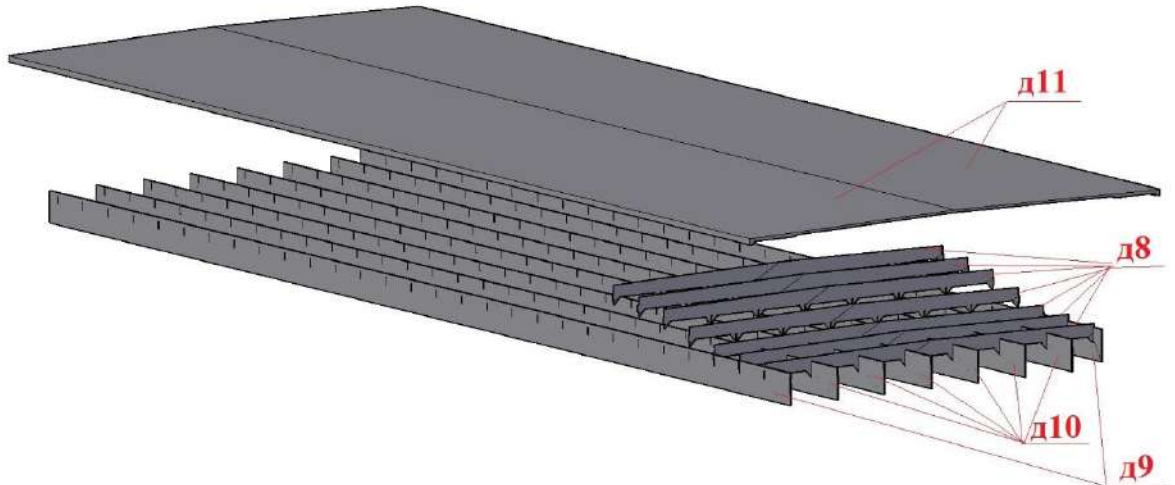


Рисунок 3.7– Схема сборки пролетного строения путепровода

Изготовленные алюминиевые детали были доработаны до нужных размеров и склеены между собой двухкомпонентным эпоксидным клеем. Изготовленная модель представлена на Рисунок 3.8 и Рисунок 3.9.

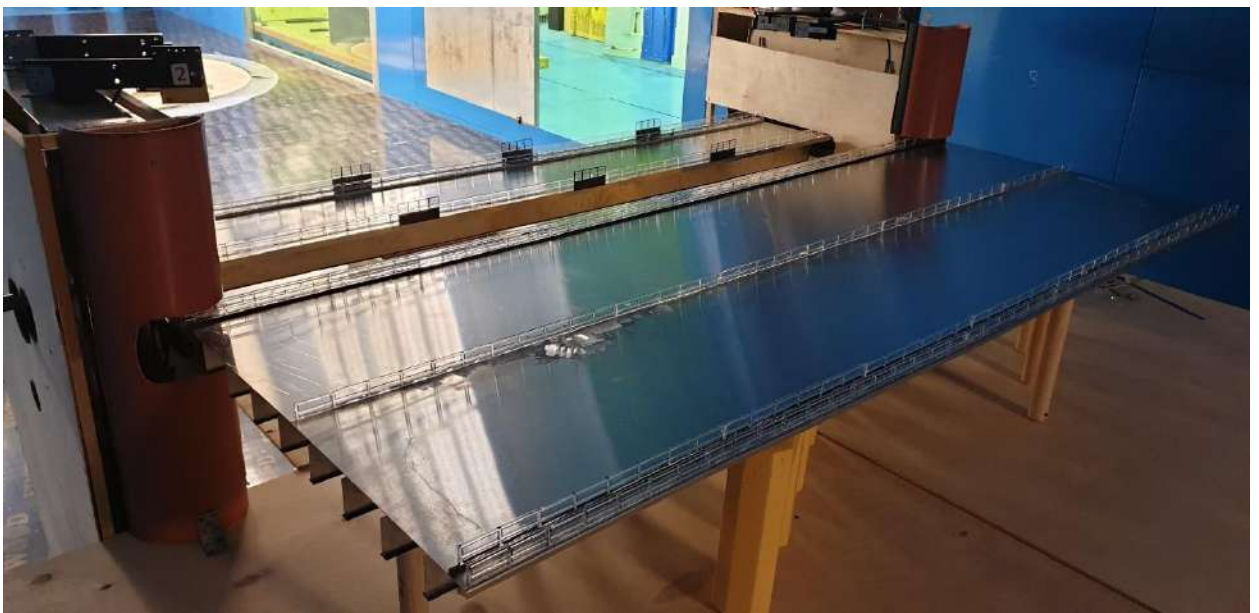


Рисунок 3.8– Отсечная модель пролетного строения (вид сверху)



Рисунок 3.9 – Отсечная модель пролетного строения (вид снизу)

Результаты измерения частот модели пролетного строения на измерительном стенде приведены на Рисунок 3.10 – Рисунок 3.12.

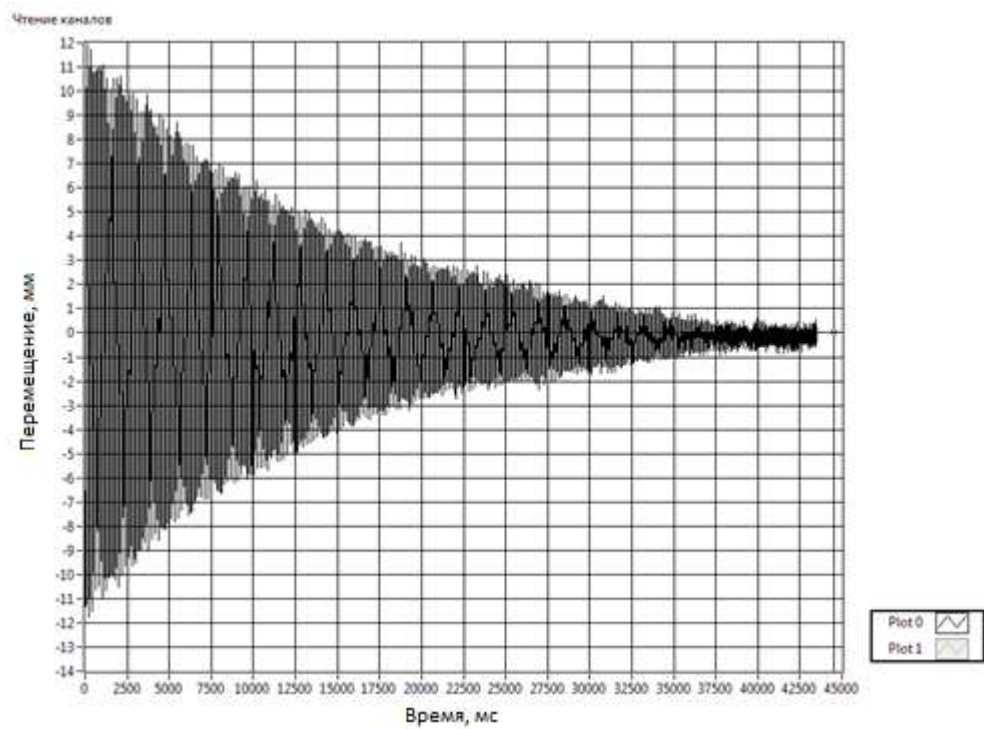


Рисунок 3.10– Затухающий колебательный процесс

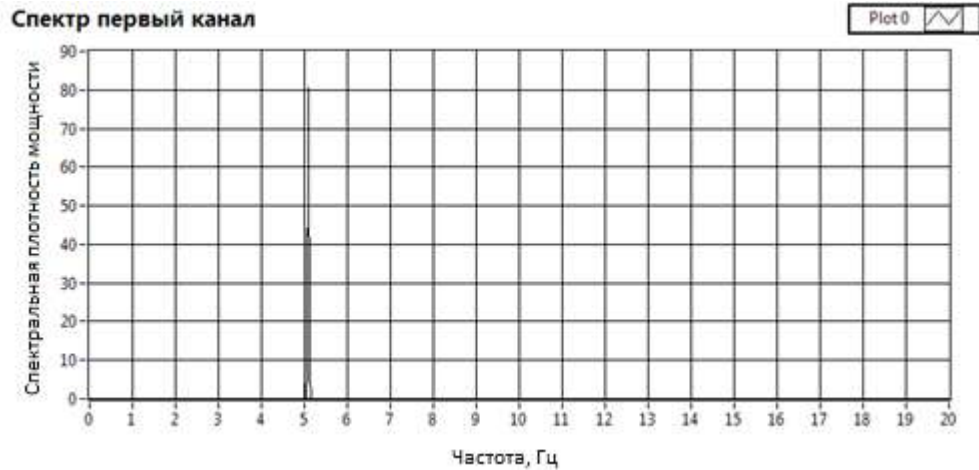


Рисунок 3.11– Спектральная плотность мощности для изгибных колебаний

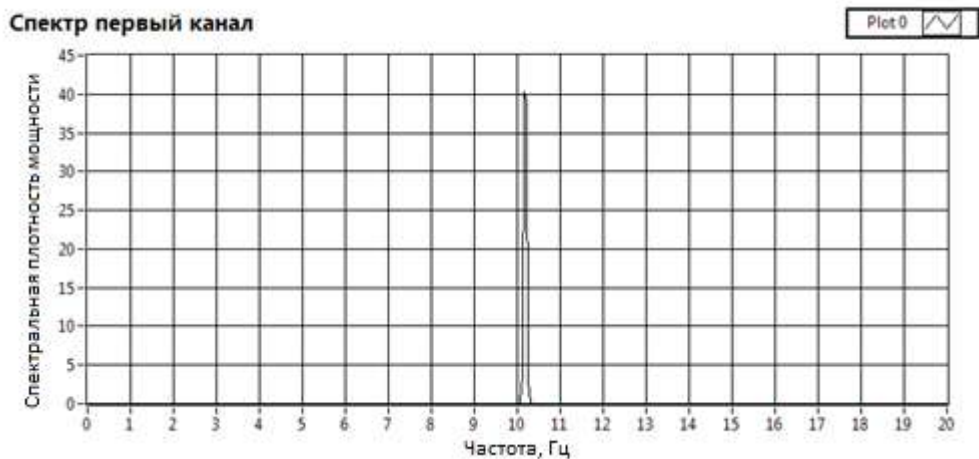


Рисунок 3.12– Спектральная плотность мощности для крутильных колебаний

Исследование аэродинамической устойчивости моста с двумя параллельными пролетными строениями, расположенными в непосредственной близости друг от друга. Оценка возможности возникновения бафтинга (Модель 2)

Балочное пролетное строение с тремя главными балками, длина максимального пролета 120 м, полная ширина пролетного строения – 26,40 м. Поперечное сечение пролетного строения приведено на Рисунок 3.13. В качестве

начального значения логарифмического декремента затухания конструкции принято $\delta=0,02$.

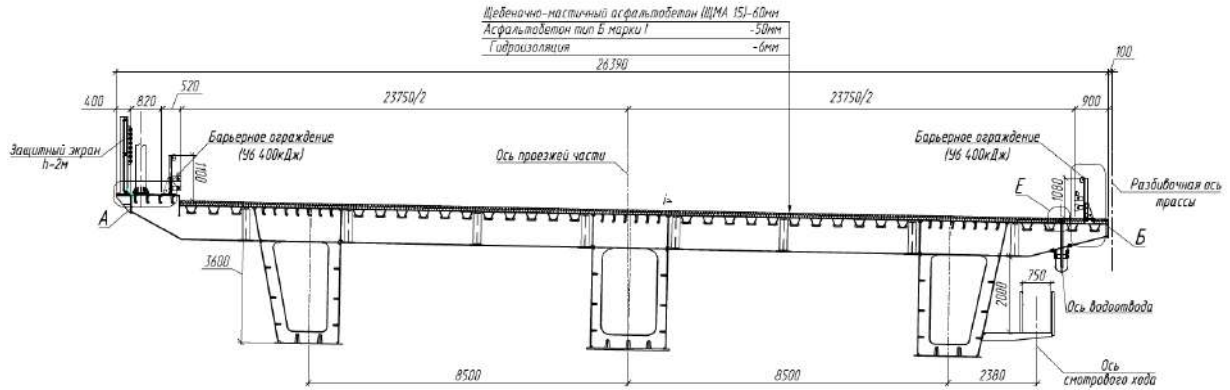


Рисунок 3.13– Схема поперечного сечения моста (Модель №2)

Учитывая размеры сечения рабочей части аэродинамической трубы (4 x 2.5 м), был выбран оптимальный из условий загромождения потока масштаб моделей 1:70. В качестве материала для изготовления моделей выбран листовой алюминий, чтобы обеспечить высокую точность геометрического подобия, легкость и высокую жесткость. Мелкие детали выполнены из пластика и оргстекла.

Длина модели пролетного строения составляет 1900 мм, ширина – 377 мм.

С учетом возможности резки, сгибания, сварки и склеивания материалов, конструкция модели была реализована по следующей схеме (Рисунок 3.14 и Рисунок 3.15).

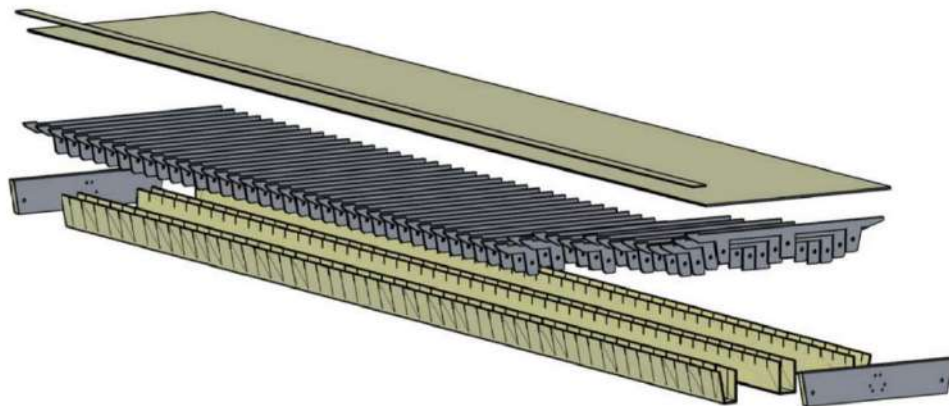


Рисунок 3.14 – Схема сборки пролетного строения (шаг 1)

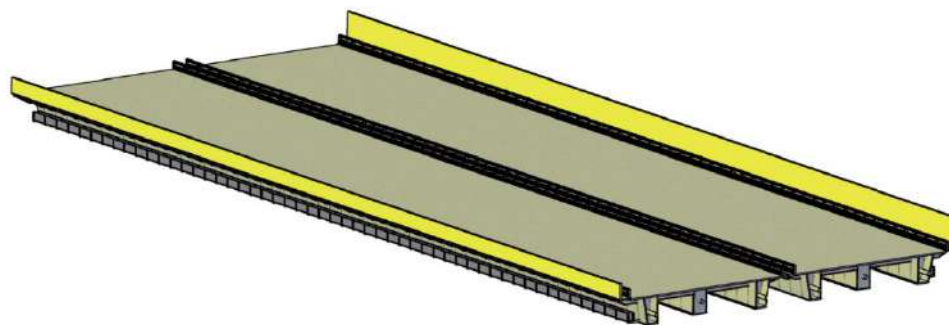


Рисунок 3.15– Схема сборки пролетного строения (шаг 2)

Изготовленные алюминиевые детали были доработаны до нужных размеров и склеены между собой двухкомпонентным эпоксидным клеем. Изготовленная модель представлена на Рисунок 3.16 и Рисунок 3.17.

Результаты измерения частот моделей пролетных строений на измерительном стенде приведены на Рисунок 3.19 – Рисунок 3.20.

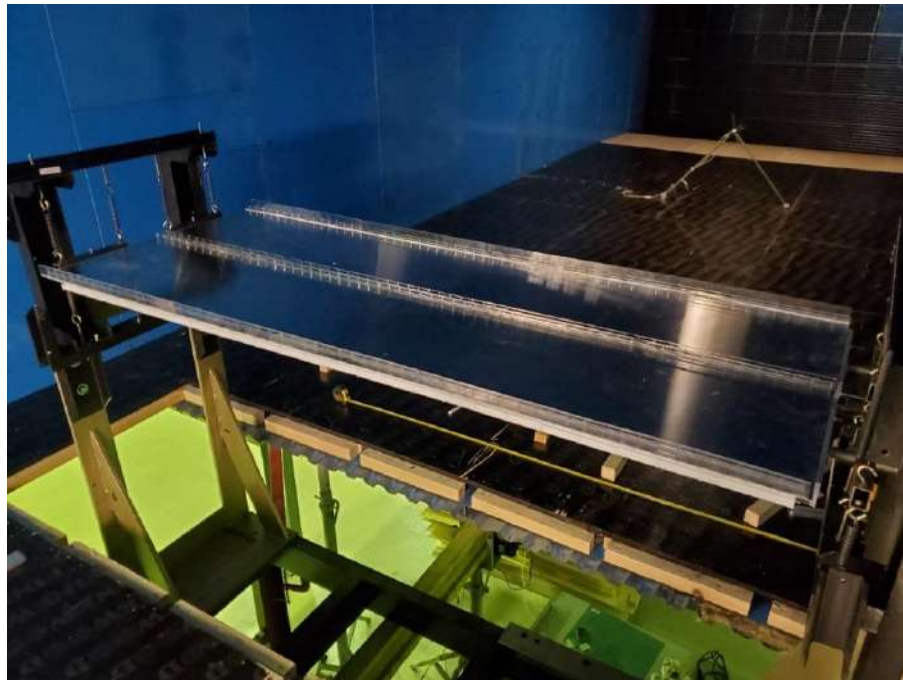


Рисунок 3.16– Отсечная модель пролетного строения (вид сверху)

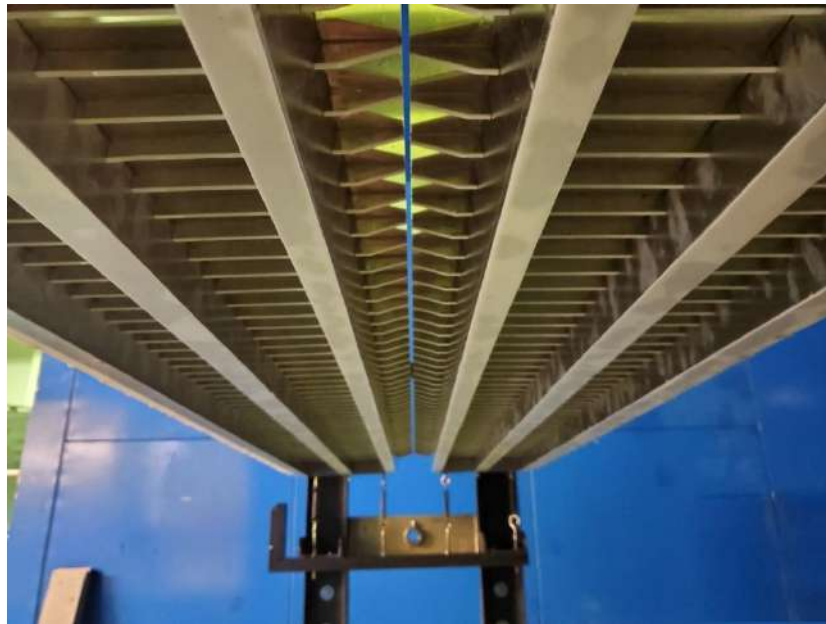


Рисунок 3.17– Отсечная модель пролетного строения (вид снизу)

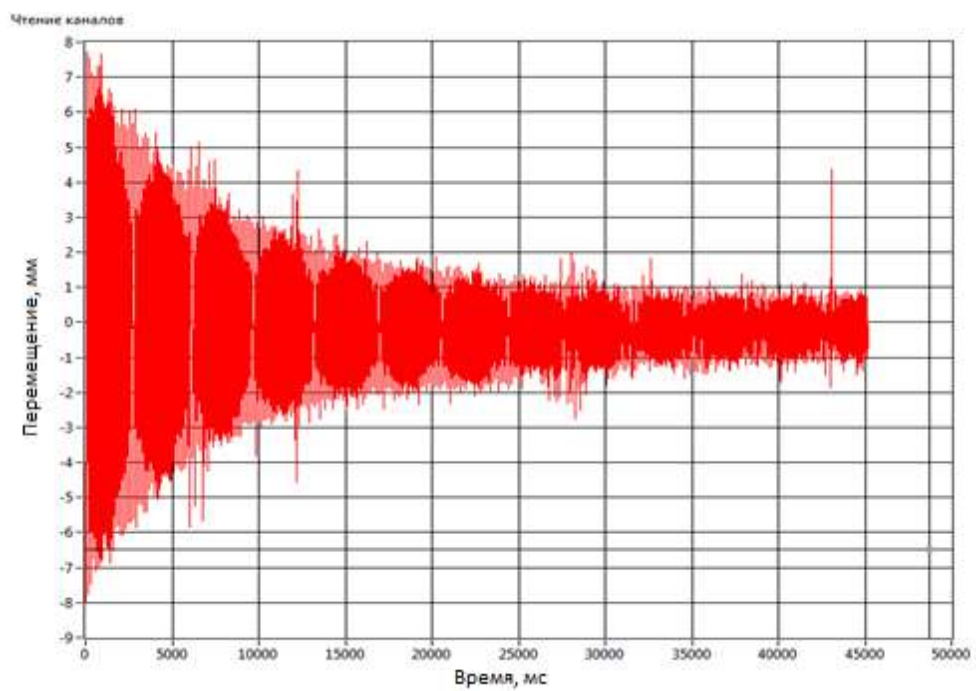


Рисунок 3.18– Затухающий колебательный процесс

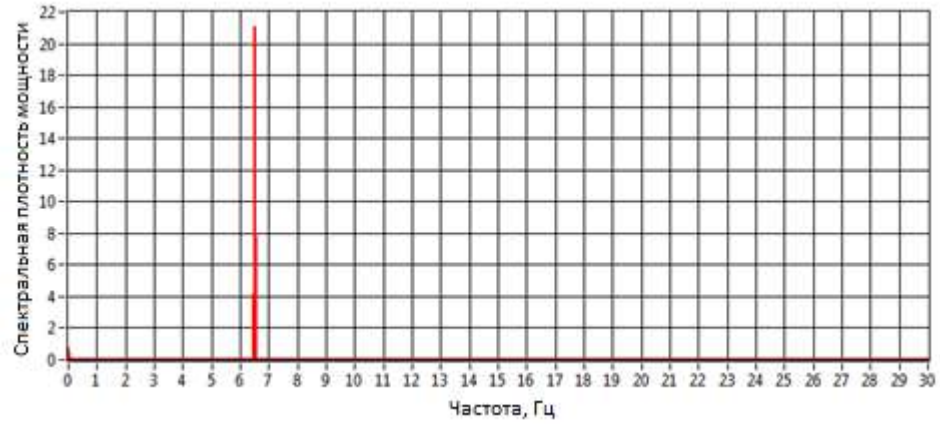


Рисунок 3.19– Спектральная плотность мощности для изгибных колебаний

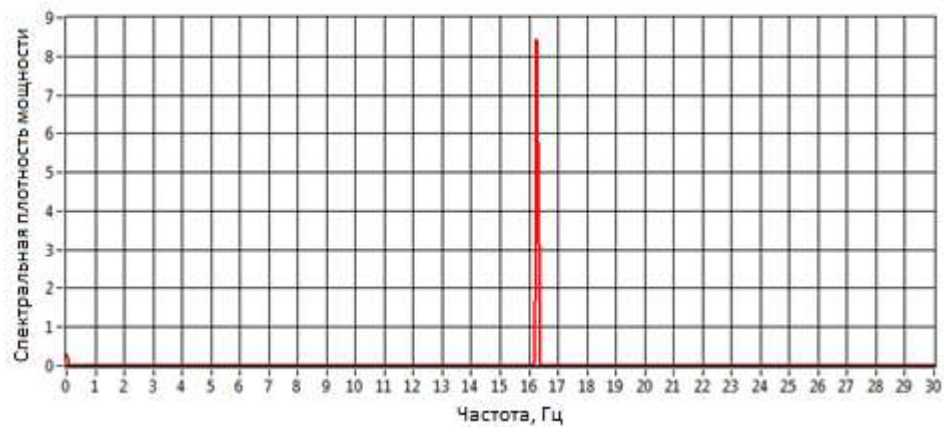


Рисунок 3.20– Спектральная плотность мощности для крутильных колебаний

Исследование влияния орографии и угла скольжения на аэродинамическую устойчивость пролетного строения (Модель 3)

Балочное пролетное строение с двумя главными балками, длина максимального пролета 130,27 м, полная ширина пролетного строения – 26,80 м. Поперечное сечение пролетного строения приведено на Рисунок 3.21. В качестве начального значения логарифмического декремента затухания конструкции принято $\delta=0,02$.

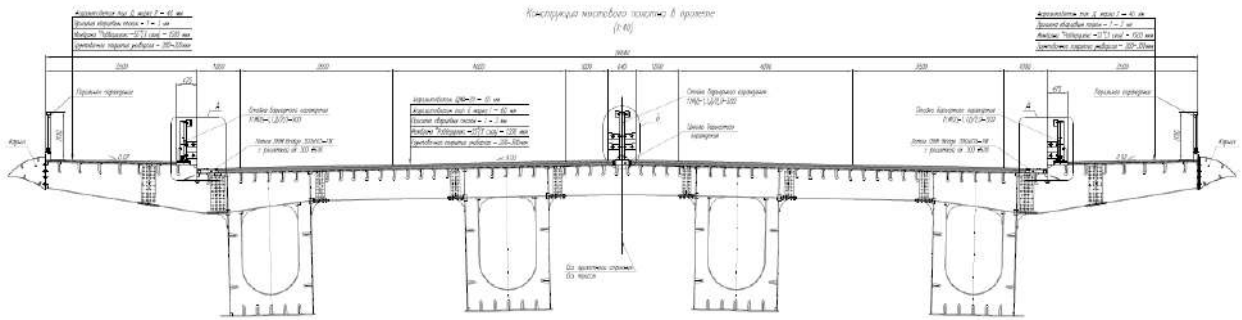


Рисунок 3.21 – Схема поперечного сечения моста (Модель №4)

Учитывая размеры сечения рабочей части аэродинамической трубы (4 x 2.5 м), был выбран оптимальный из условий загромождения потока масштаб моделей 1:70. В качестве материала для изготовления моделей выбран листовой алюминий, чтобы обеспечить высокую точность геометрического подобия, легкость и высокую жесткость. Мелкие детали выполнены из пластика и оргстекла.

Длина модели пролетного строения составляет 1900 мм, ширина – 476 мм.

С учетом возможности резки, сгибания, сварки и склеивания материалов, конструкция модели была реализована по следующей схеме (Рисунок 3.22 и Рисунок 3.23).

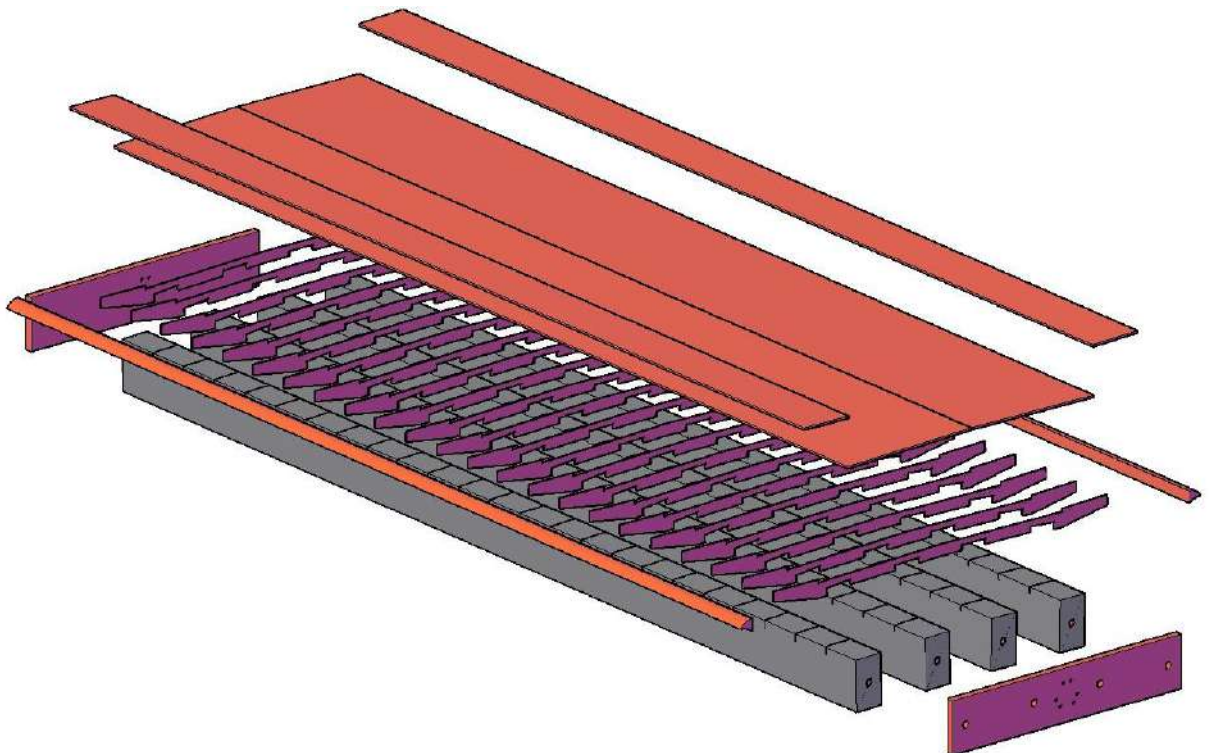


Рисунок 3.22 – Схема сборки пролетного строения (шаг 1)

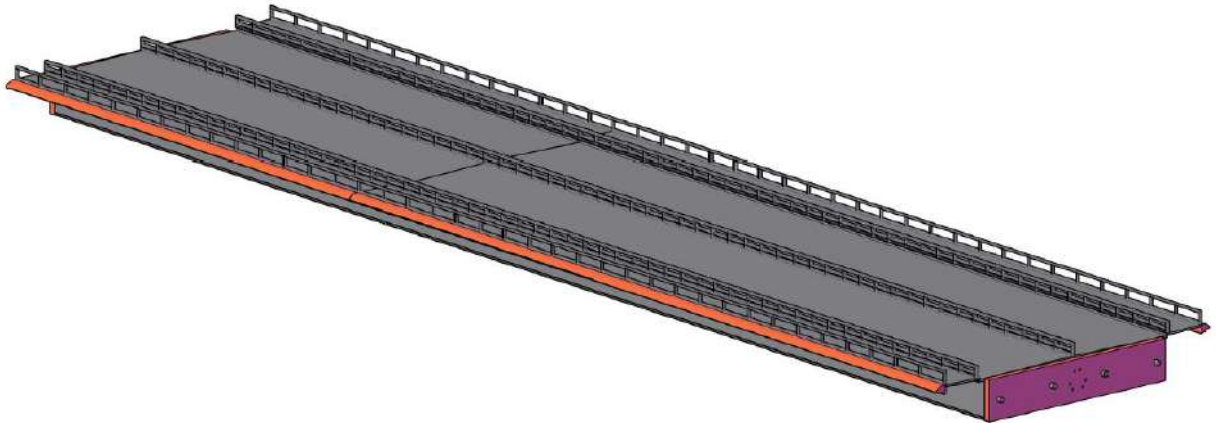


Рисунок 3.23– Схема сборки пролетного строения (шаг 2)

Изготовленные алюминиевые детали были доработаны до нужных размеров и склеены между собой двухкомпонентным эпоксидным клеем. Изготовленная модель представлена на Рисунок 3.24 и Рисунок 3.25.

Результаты измерения частот моделей пролетных строений на измерительном стенде приведены на Рисунок 3.26 –Рисунок 3.28.

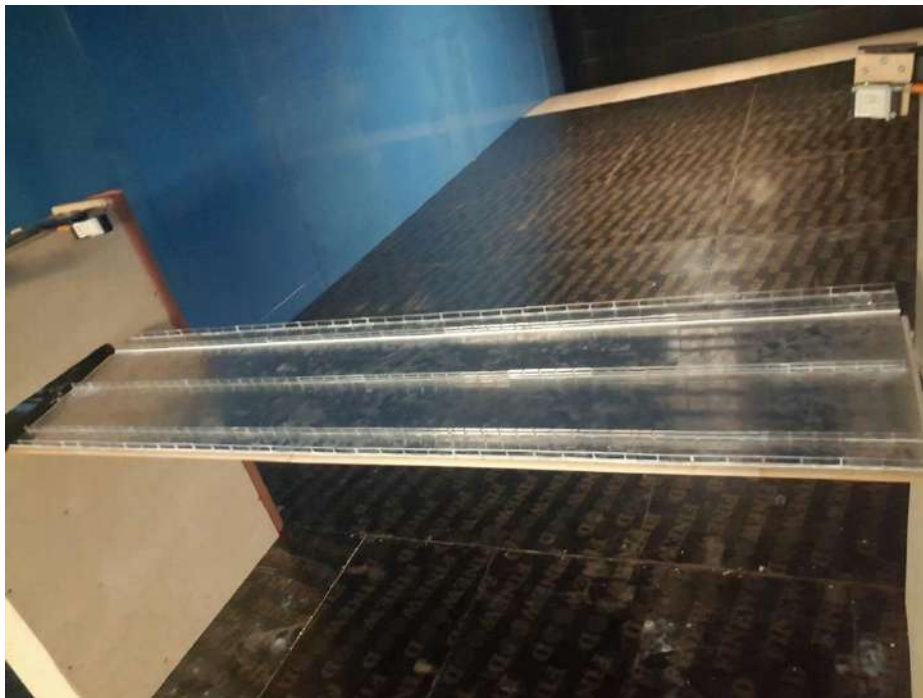


Рисунок 3.24– Отсечная модель пролетного строения (вид сверху)



Рисунок 3.25– Отсечная модель пролетного строения (вид снизу)

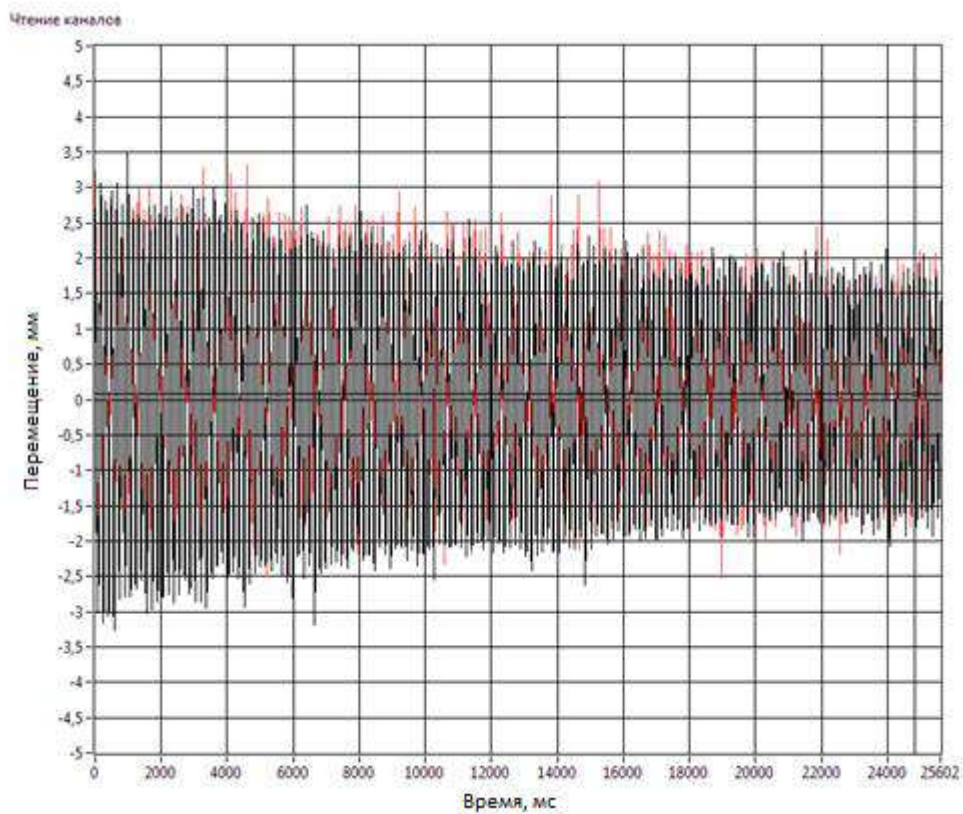


Рисунок 3.26– Затухающий колебательный процесс

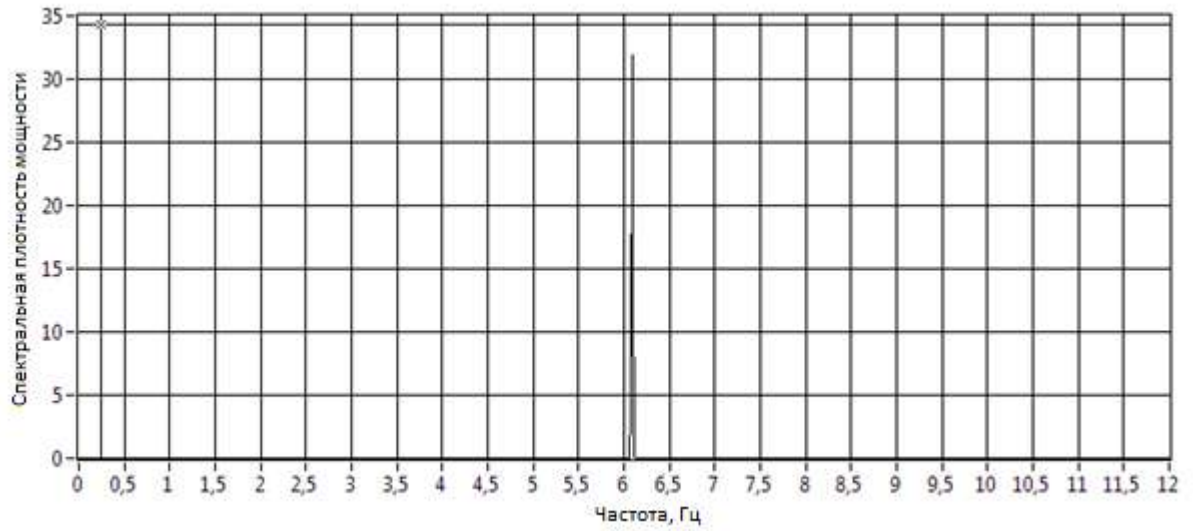


Рисунок 3.27– Спектральная плотность мощности для изгибных колебаний

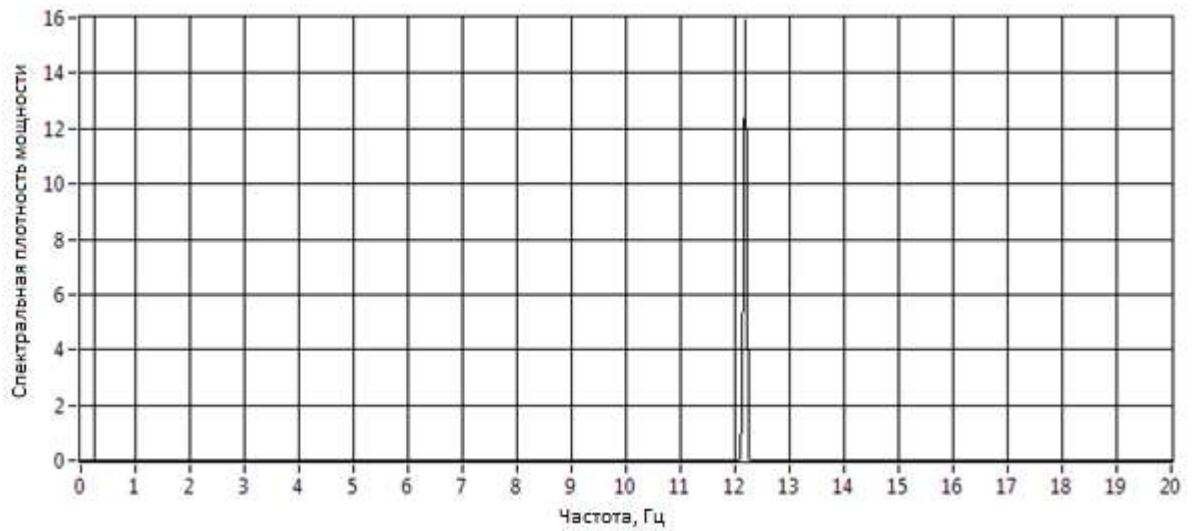


Рисунок 3.28 – Спектральная плотность мощности для крутильных колебаний

3.2.2. Результаты экспериментальных исследований

Исследование аэродинамической устойчивости пролетного строения в условиях плотной городской застройки. Оценка влияния существующего путепровода на проектируемый (Модель 1)

При проведении динамических испытаний учитывалось расположение исследуемого пролетного строения эстакады в непосредственной близости от существующего путепровода, в связи с этим рассматривались два направления набегающего потока:

1. Под углом 90° к исследуемому ПС, существующий путепровод с наветренной стороны (Рисунок 3.29),

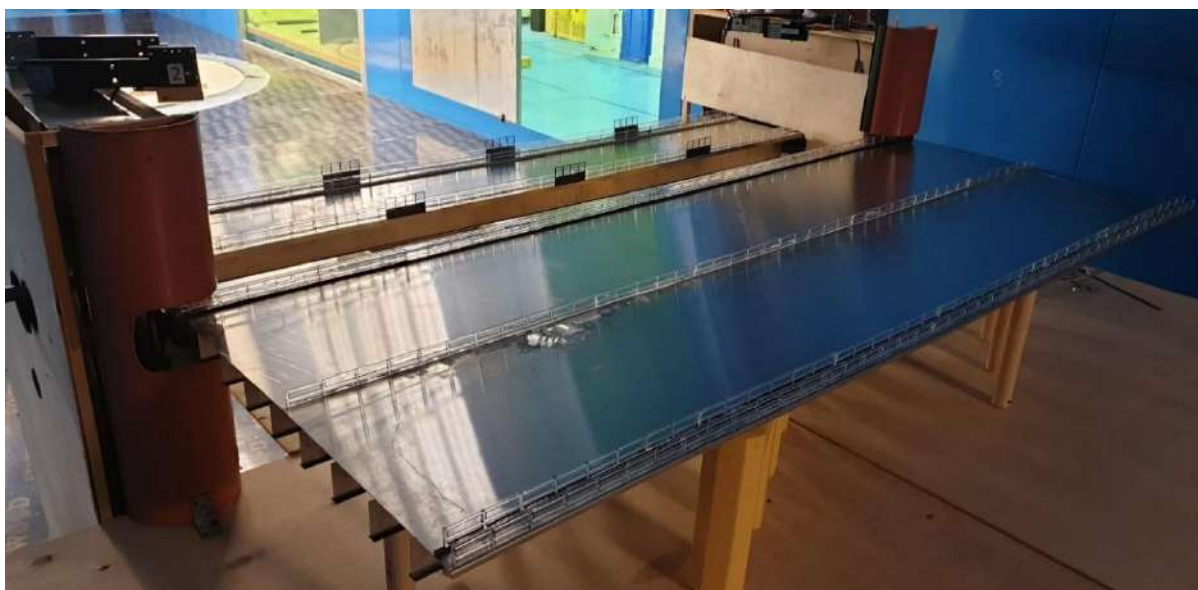


Рисунок 3.29 – Направление потока 1 (существующий путепровод с наветренной стороны)

2. Под углом 90° к исследуемому ПС, существующий путепровод с подветренной стороны (Рисунок 3.30).

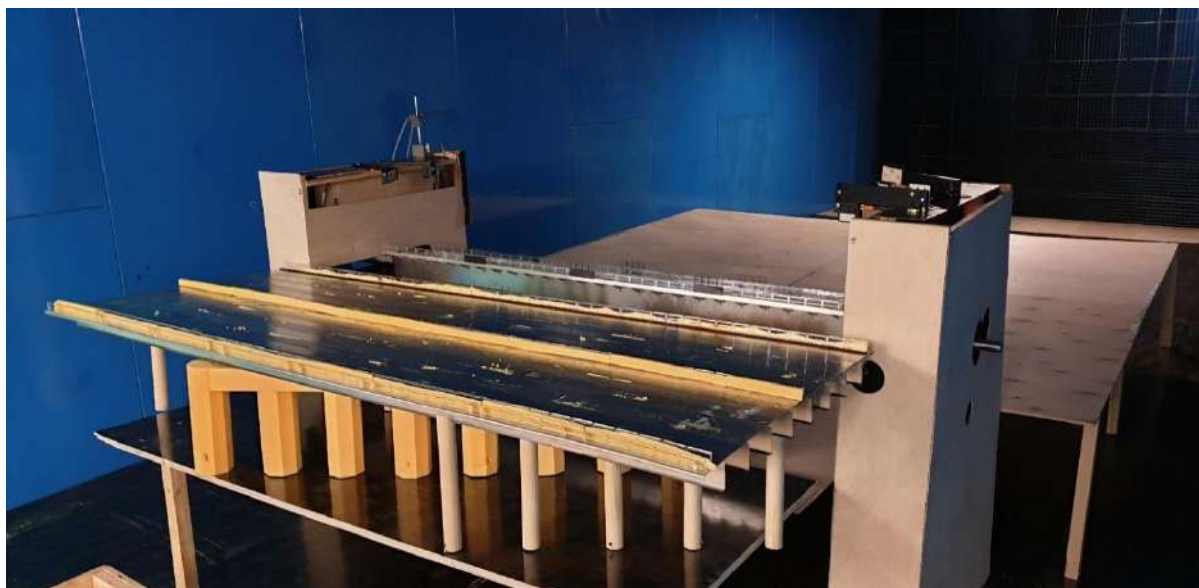


Рисунок 3.30 – Направление потока 2 (существующий путепровод с подветренной стороны)

Дополнительно выполнена оценка влияния автомобильного трафика и снеговых отложений на барьерных заграждениях на аэродинамическую устойчивость (Рисунок 3.31–Рисунок 3.32).



Рисунок 3.31– Оценка влияния автомобильного трафика на аэродинамическую устойчивость

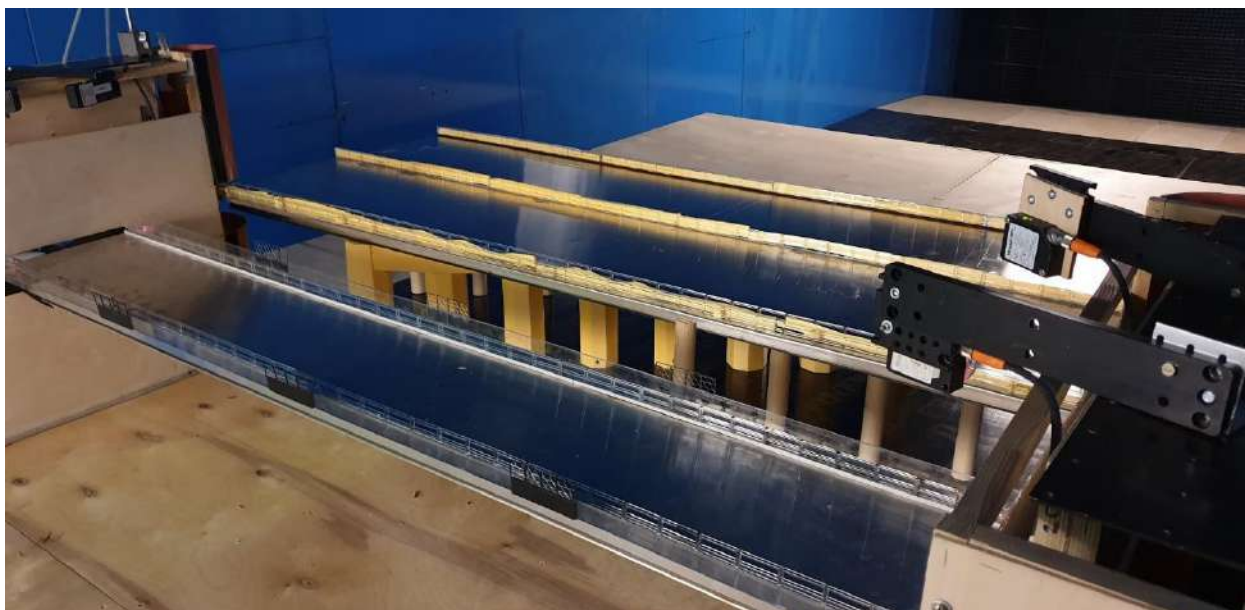


Рисунок 3.32– Оценка влияния снеговых отложений на барьерных ограждениях на аэродинамическую устойчивость

Угол атаки α (угол вертикального наклона вектора скорости потока ветра) изменялся в диапазоне от минус 10° до плюс 10° (Рисунок 3.33).

Измерение устойчивости представлено как график перемещения ПС в полном масштабе в зависимости от средней скорости ветра, указанной также в полном масштабе (Рисунок 3.34–Рисунок 3.37).

Значение критической скорости флаттера рассчитано в соответствии с требованиями п. 6.24 СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы».

$$U_{кр} = 1,5 * U_{расч} = 32,1\text{м/с.} \quad (3.8)$$

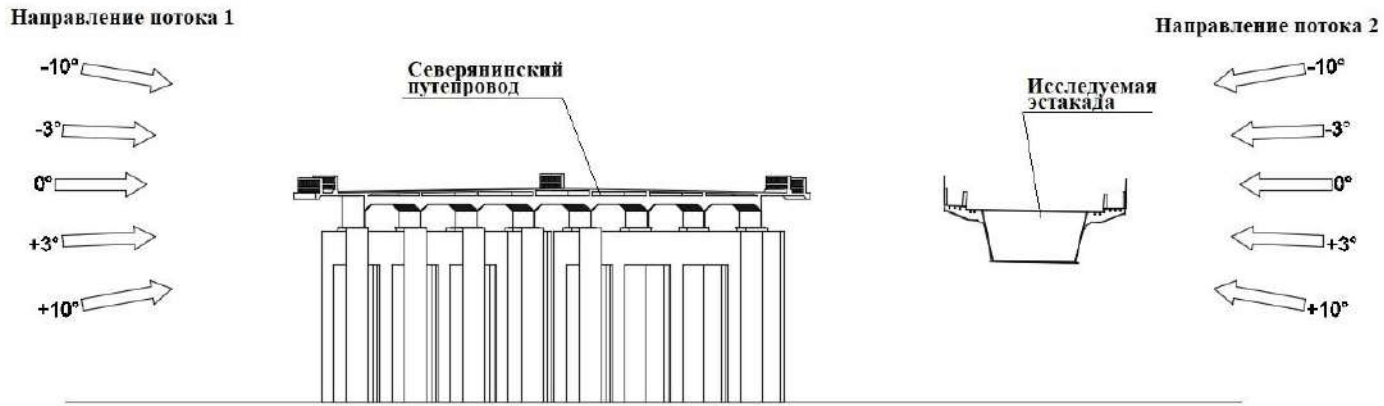


Рисунок 3.33– Направления набегающего потока и изменение угла атаки при проведении динамических испытаний

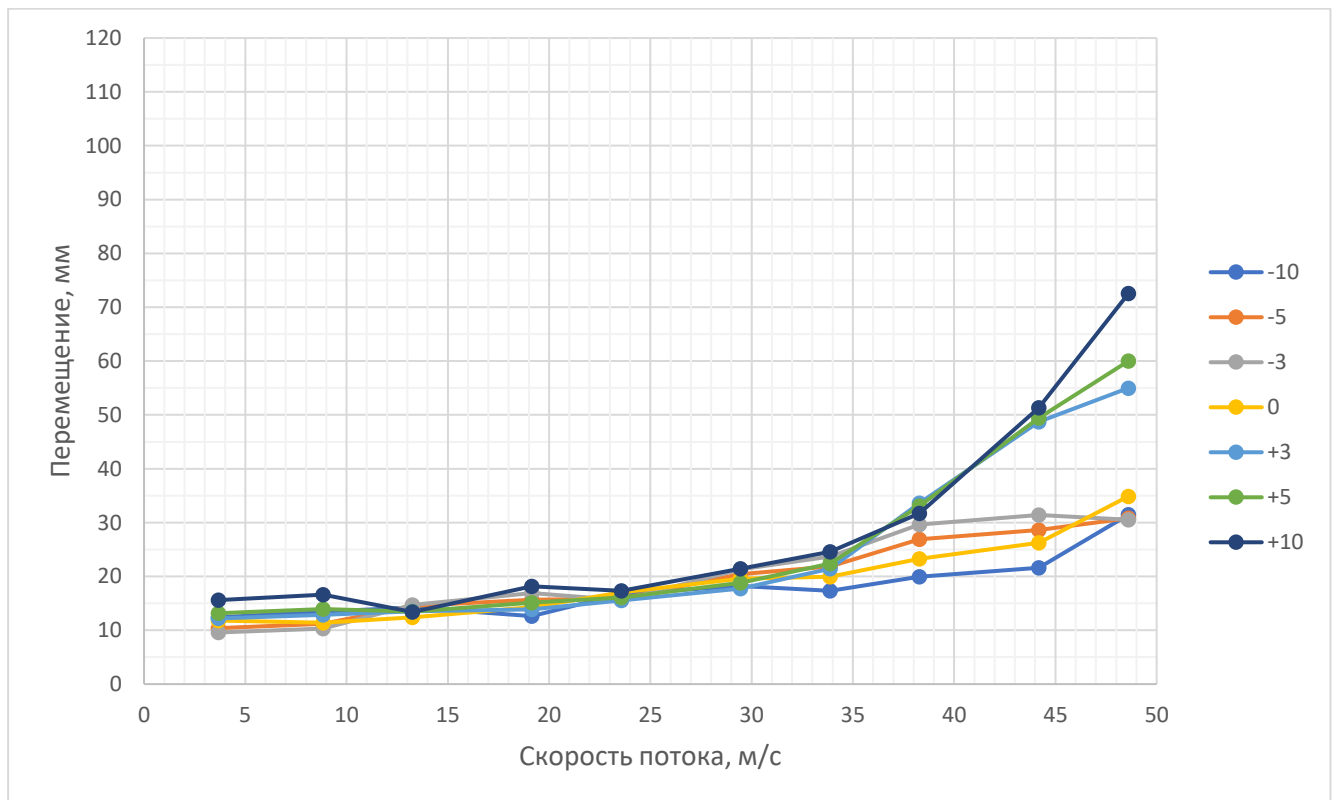


Рисунок 3.34– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра при различных углах атаки, направление потока 1 (существующий путепровод с наветренной стороны)

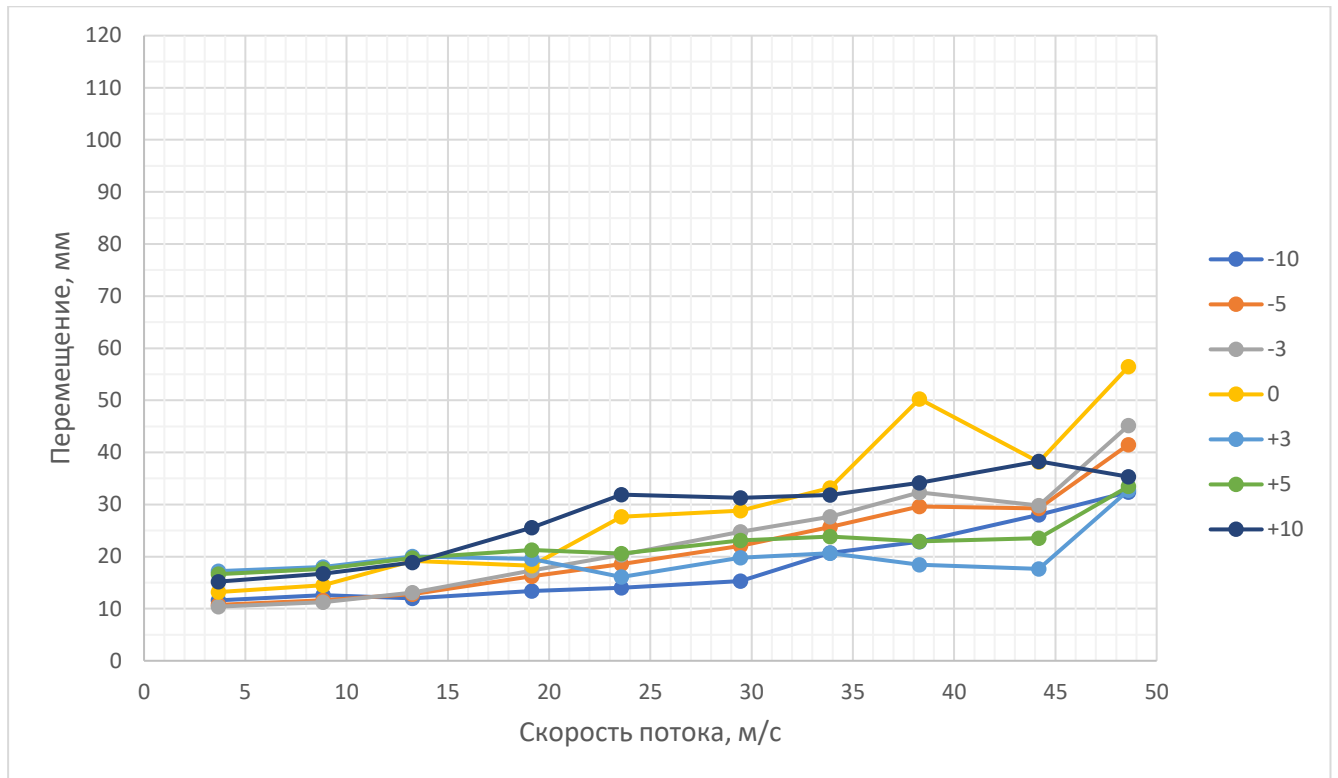


Рисунок 3.35– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра при различных углах атаки, направление потока 2 (существующий путепровод с подветренной стороны)

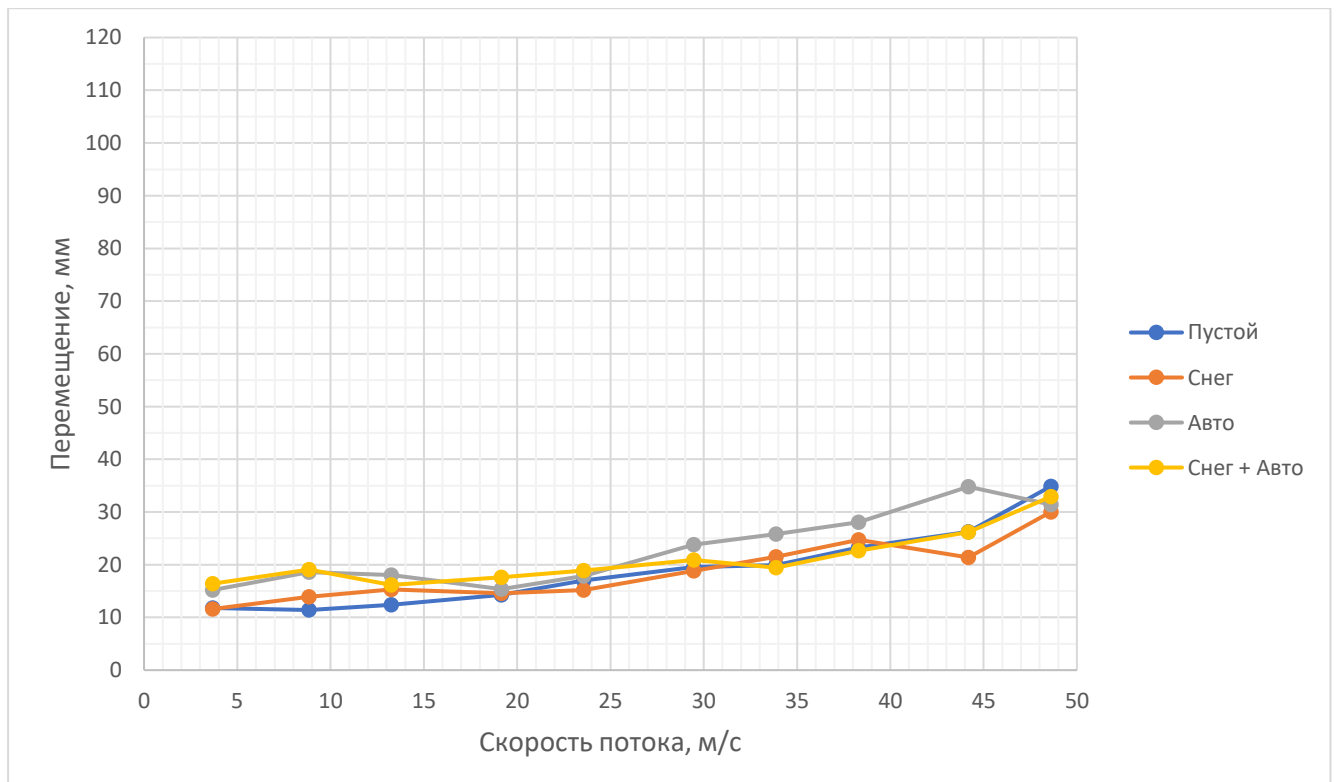


Рисунок 3.36 – Оценка влияния автомобильного трафика и снеговых отложений на барьерных заграждениях на аэродинамическую устойчивость, направление потока 1, угол атаки 0 (существующий путепровод с наветренной стороны)

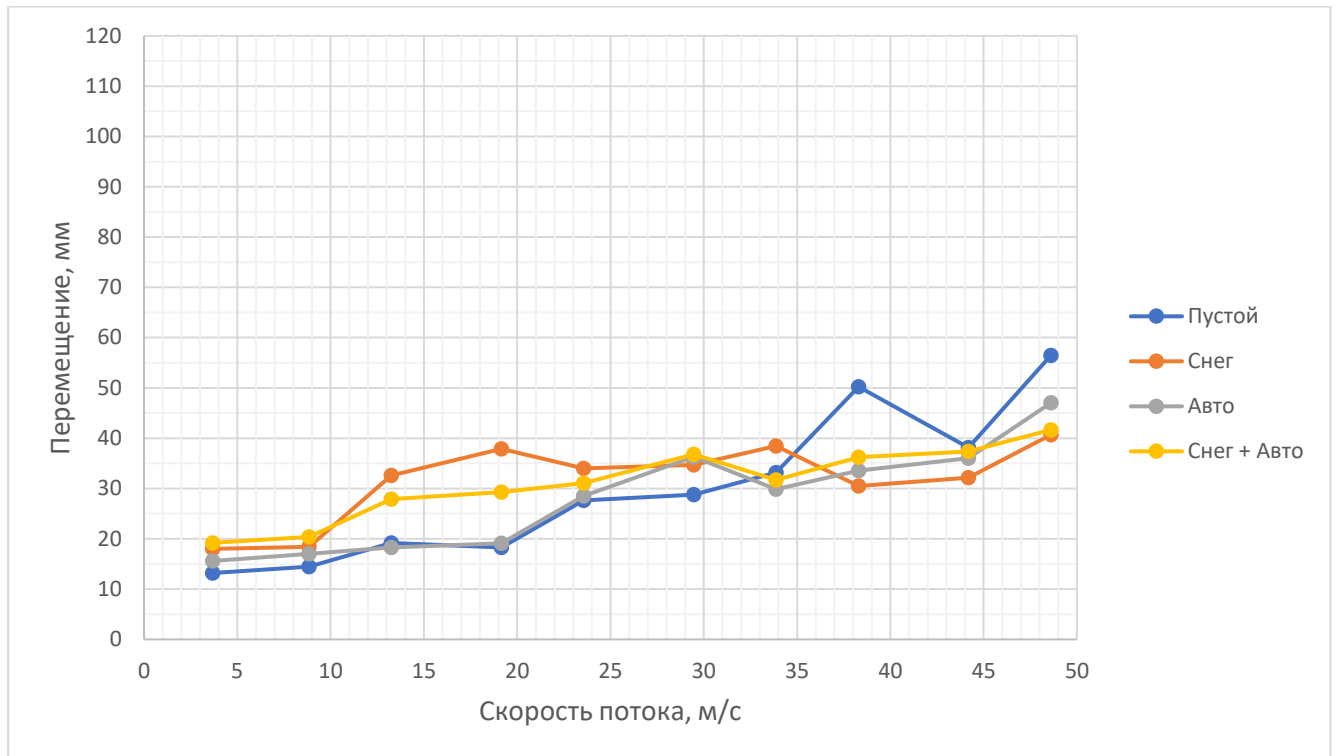


Рисунок 3.37 – Оценка влияния автомобильного трафика и снеговых отложений на барьерных заграждениях на аэродинамическую устойчивость, направление потока 2, угол атаки 0 (существующий путепровод с подветренной стороны)

По результатам экспериментального исследования устойчивости пролетного строения для 2-х рассматриваемых направлений ветра и углов атаки в диапазоне от минус 10° до плюс 10° явлений аэродинамической неустойчивости не выявлено. Максимальная амплитуда колебаний пролетного строения на скоростях набегающего потока в диапазоне до критической скорости флаттера составляет 33 мм.

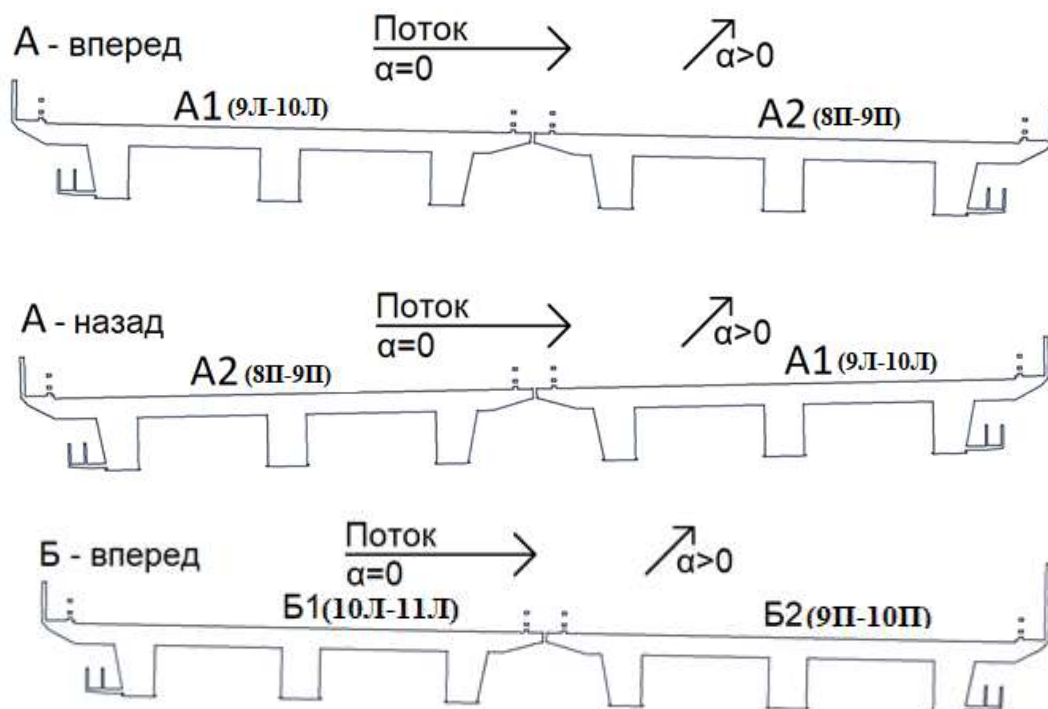
Установлено, что наличие автомобильного трафика на пролетном строении и снеговых отложений на барьерных заграждениях не оказывает существенного влияния на аэродинамическую устойчивость.

Исследование аэродинамической устойчивости моста с двумя параллельными пролетными строениями, расположенными в непосредственной близости друг от друга. Оценка возможности возникновения бафтинга (Модель 2)

Измерение устойчивости представлено как график перемещения ПС в полном масштабе в зависимости от средней скорости ветра, указанной также в полном масштабе (рис. Рисунок 3.39–Рисунок 3.43). Вертикальными линиями на графиках указаны пороговые значения скорости потока (расчетная – желтая линия и критическая скорость флаттера – красная линия). Значение критической скорости флаттера рассчитано в соответствии с требованиями п. 6.24 СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы».

$$U^{кр} = 1,5 * U^{расч} = 28,9\text{м/с.} \quad (3.9)$$

Исследования выполнены для углов атаки $\alpha = -5, -3, 0, +3, +5^\circ$. Рассматриваемые при проведении экспериментальных исследований схемы расположения пролетных строений приведены на Рисунок 3.38.



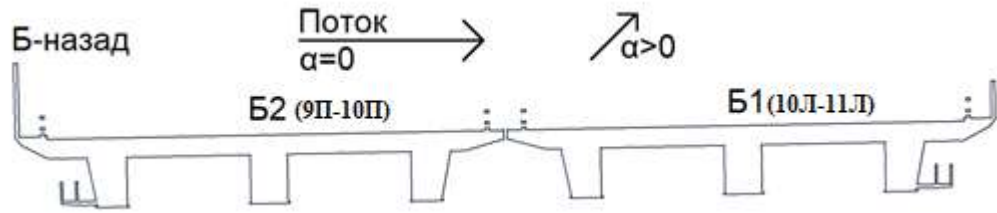


Рисунок 3.38– Рассматриваемые при проведении экспериментальных исследований схемы расположения пролетных строений и углы атаки набегающего ветрового потока

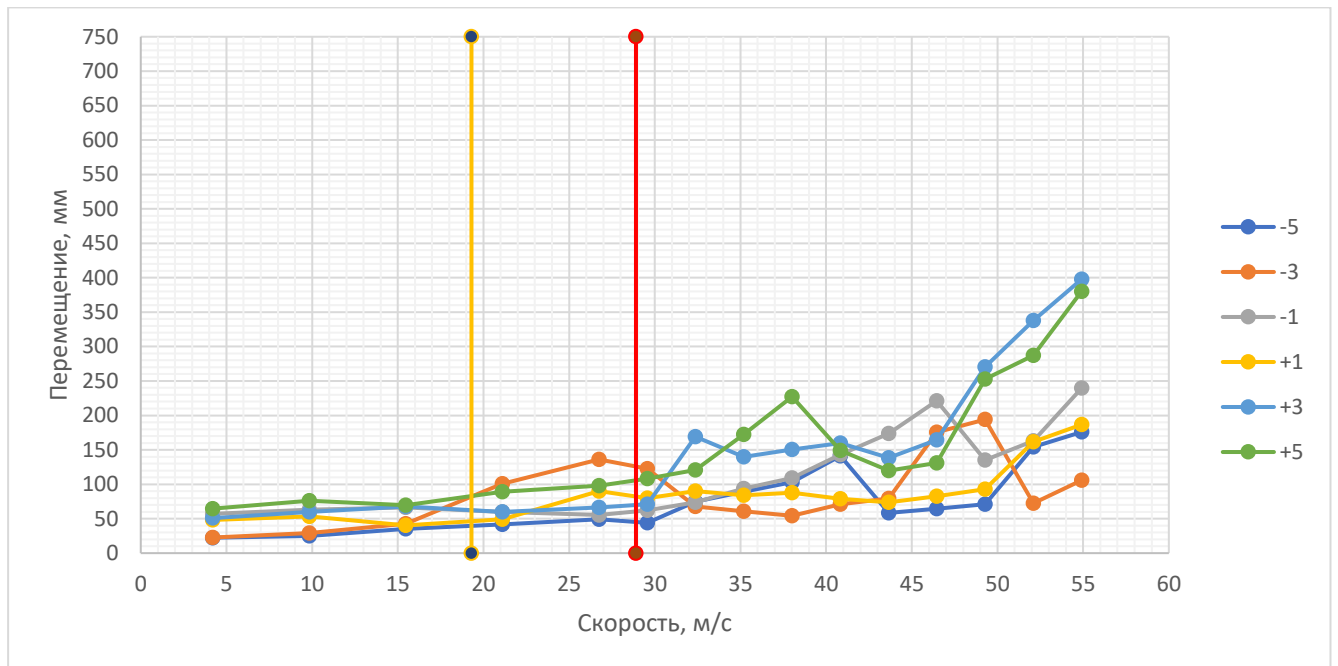


Рисунок 3.39– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения А2 (8П-9П) при углах атаки (-5° - $+5^\circ$). Направление «Назад»

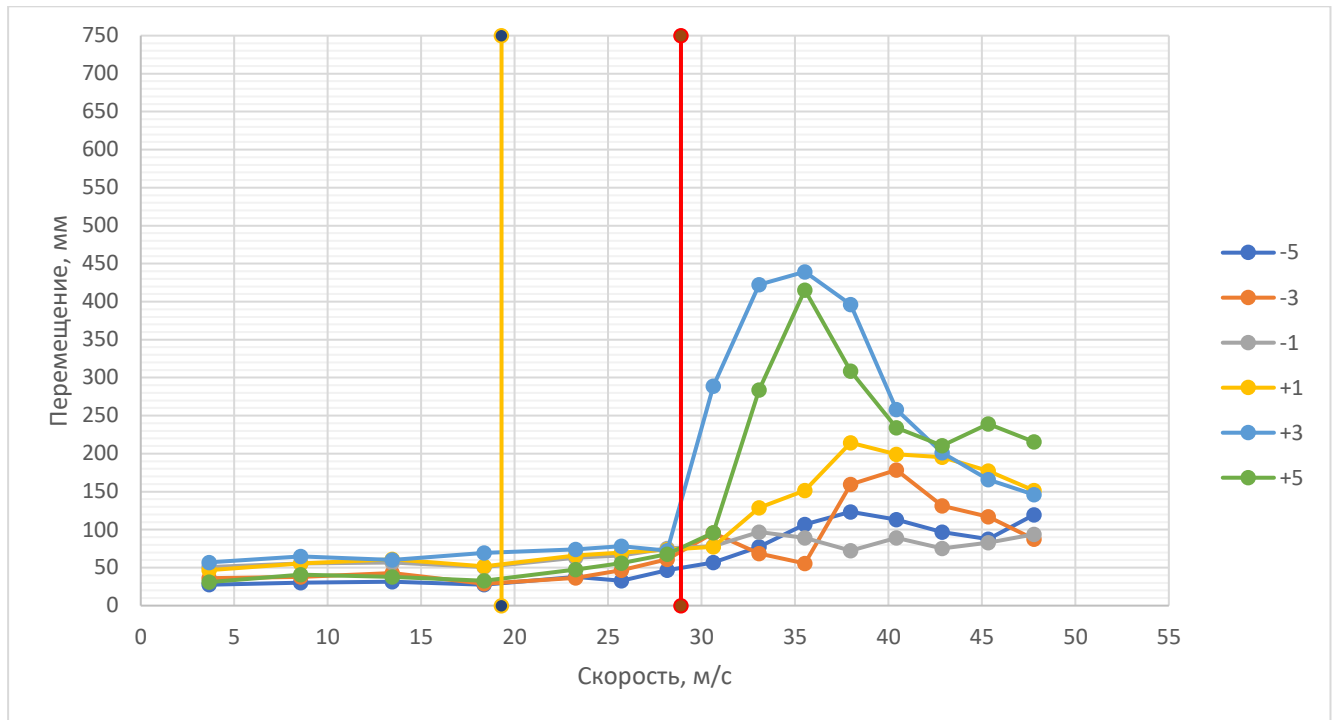


Рисунок 3.40– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения А2 (8П-9П) при углах атаки (-5° - $+5^{\circ}$). Направление «Вперед»

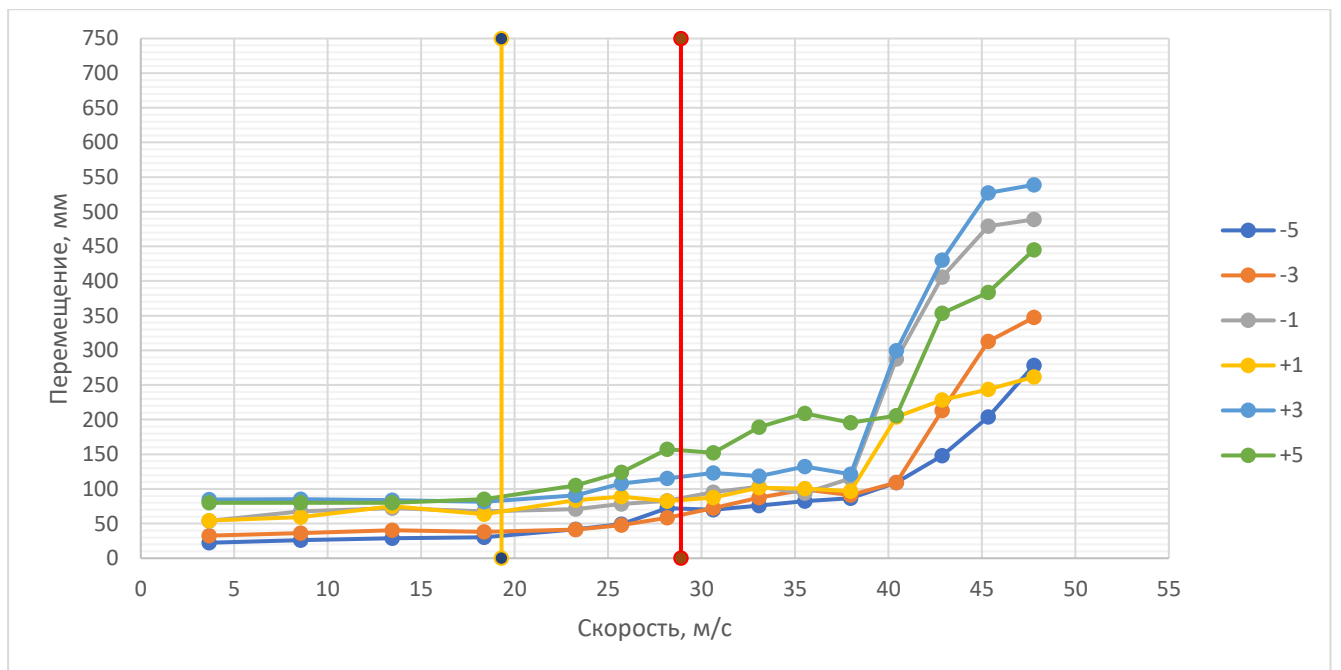


Рисунок 3.41– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения Б2 (9П-10П) при углах атаки (-5° - $+5^{\circ}$). Направление «Назад»

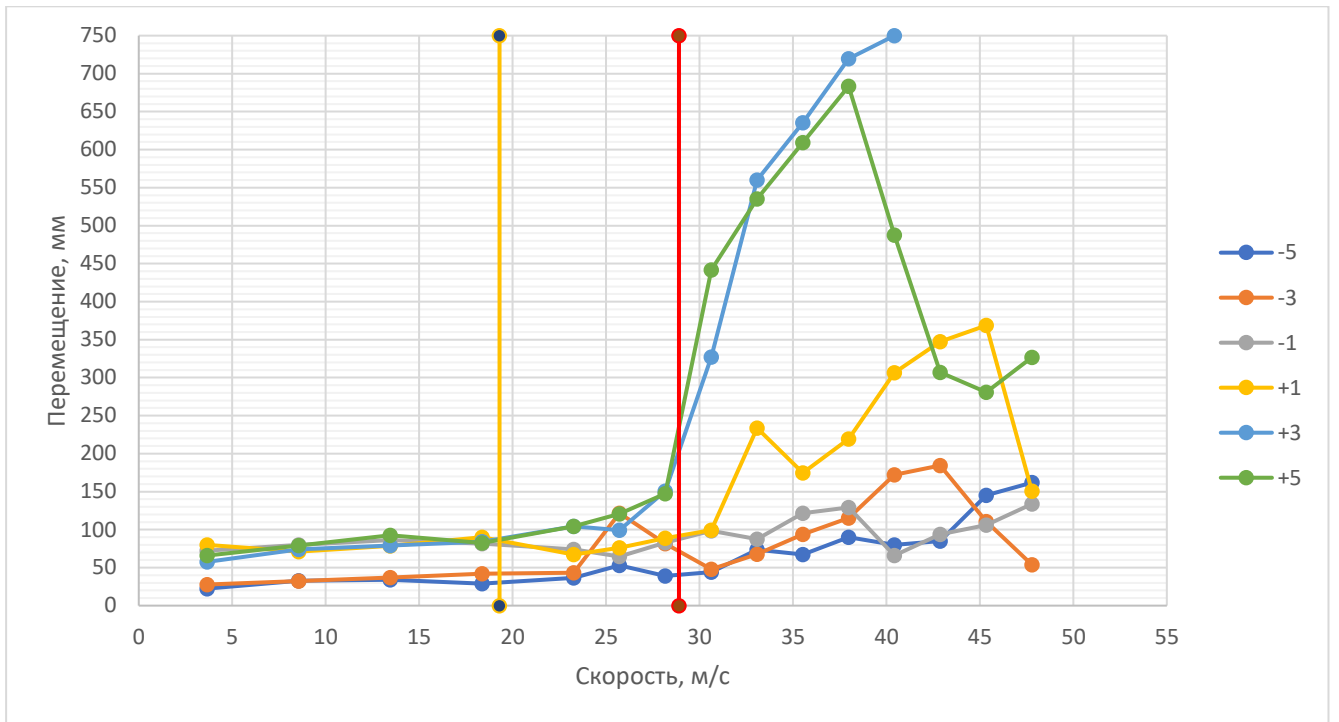


Рисунок 3.42– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения Б2 (9П-10П) при углах атаки (-5° - $+5^\circ$). Направление «Вперед»

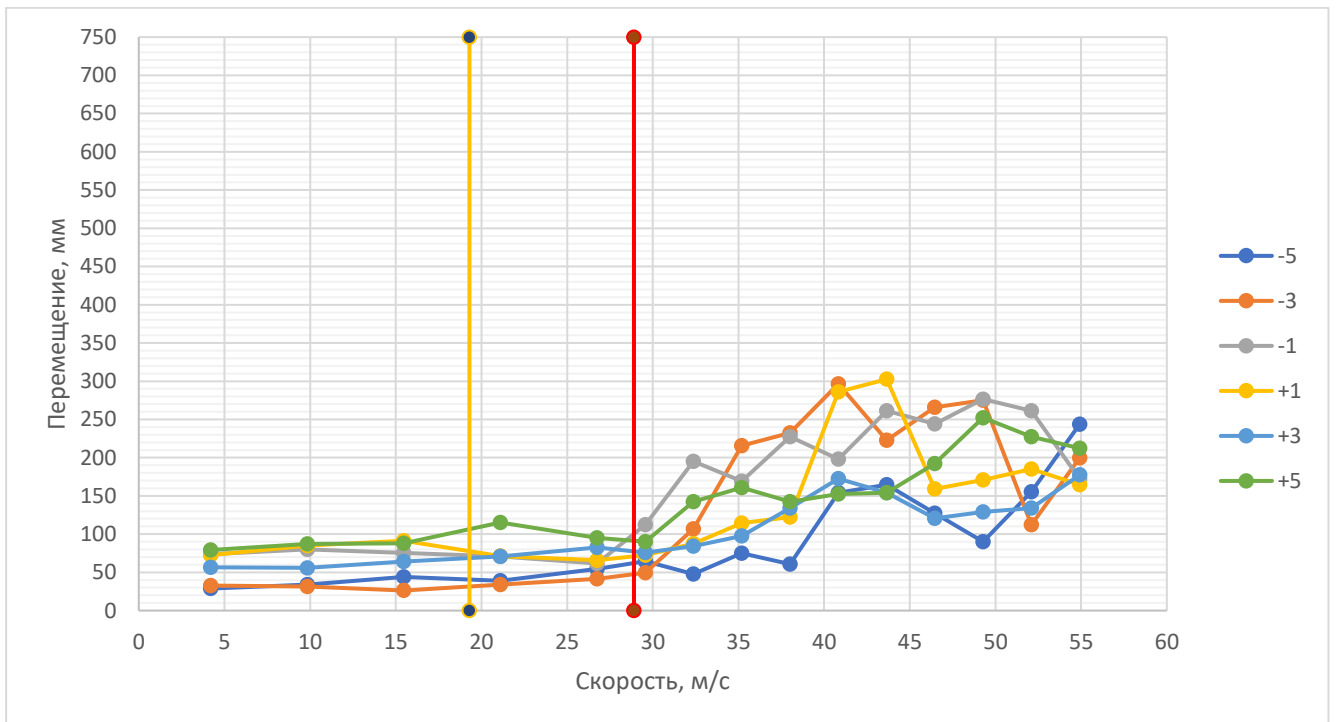


Рисунок 3.43– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения Б1 (10Л-11Л) при углах атаки (-5° - $+5^\circ$). Направление «Назад»

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.

Исследование влияния орографии и угла скольжения на аэродинамическую
устойчивость пролетного строения (Модель 3)

Результаты динамических испытаний аэродинамической устойчивости при угле скольжения 0°.

Измерение устойчивости представлено как график перемещения ПС в полном масштабе в зависимости от средней скорости ветра, указанной также в полном масштабе (Рисунок 3.44). Вертикальными линиями на графиках указаны пороговые значения скорости потока (расчетная – желтая линия и критическая скорость флаттера – красная линия). Значение критической скорости флаттера рассчитано в соответствии с требованиями п. 6.24 СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы».

$$U^{кр} = 1,5 * U^{расч} = 34\text{м/с.} \quad (3.10)$$

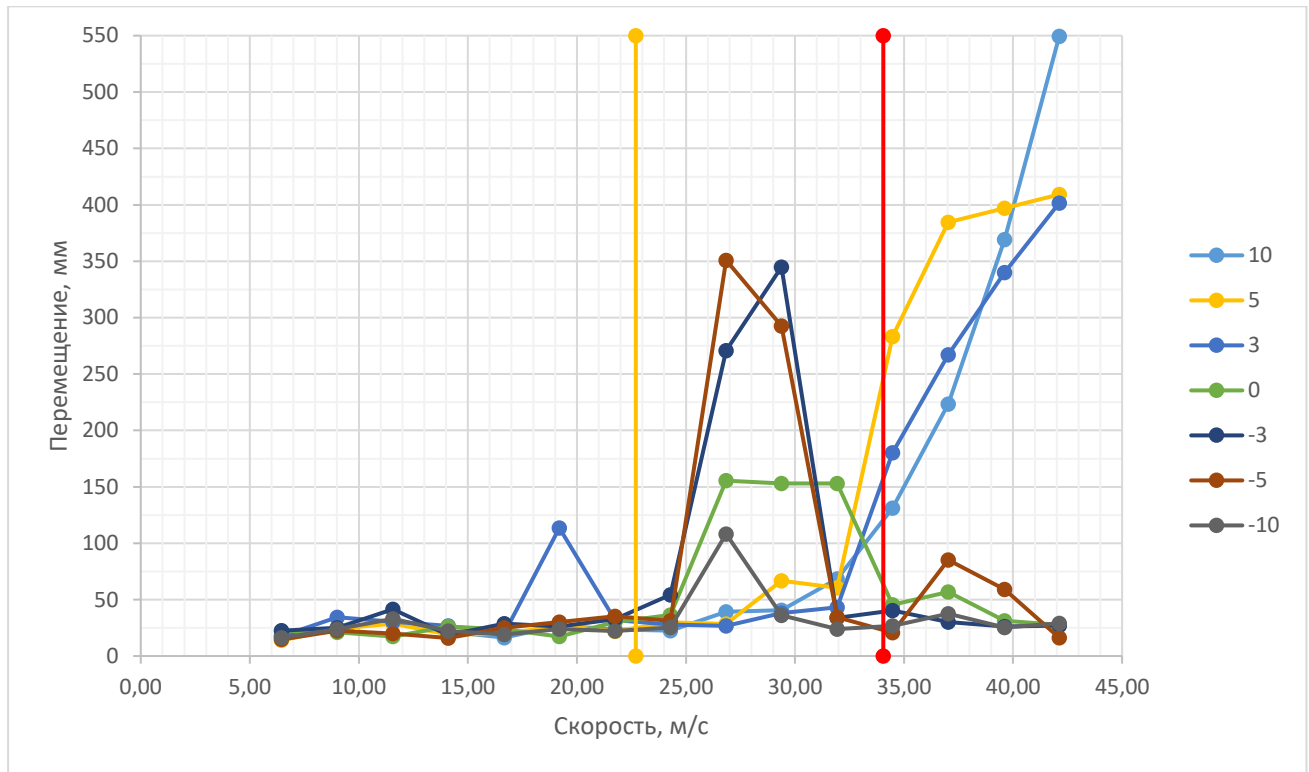


Рисунок 3.44– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, угол скольжения 0

Таким образом, динамические испытания модели с $\delta = 0,02$ показали наличие вихревого возбуждения на следующих скоростях ветра:

- при направлении потока $+ 3^\circ$ при скорости потока от 16,7 до 21,7 м/с с увеличением амплитуды колебаний до 114 мм при частоте колебаний 0,596 Гц;
- при направлении потока 0° при скорости потока от 24,3 до 34,5 м/с с увеличением амплитуды колебаний до 156 мм при частоте колебаний 0,596 Гц;
- при направлении потока $- 3^\circ$ при скорости потока от 24,3 до 32 м/с с увеличением амплитуды колебаний до 345 мм при частоте колебаний 0,596 Гц;
- при направлении потока $- 5^\circ$ при скорости потока от 24,3 до 32 м/с с увеличением амплитуды колебаний до 351 мм при частоте колебаний 0,596 Гц;
- при направлении потока $- 10^\circ$ при скорости потока от 24,3 до 29,4 м/с с увеличением амплитуды колебаний до 109 мм при частоте колебаний 0,596 Гц.

Результаты динамических испытаний аэродинамической устойчивости при угле скольжения $43.^\circ$

Учитывая нетиповую ориентацию пролетного строения относительно русла реки (мост расположен под углом около 43° к продольной оси русла), отличающуюся от рекомендации п.5.5 [91], были проведены дополнительные экспериментальные исследования с целью уточнения полученных результатов и выявления наиболее неблагоприятного направления ветрового потока (угла скольжения). Схема расположения модели пролетного строения в специализированном стенде приведены на Рисунок 3.45.

Измерение устойчивости представлено как график перемещения ПС в полном масштабе в зависимости от средней скорости ветра также в полном масштабе на Рисунок 3.46.

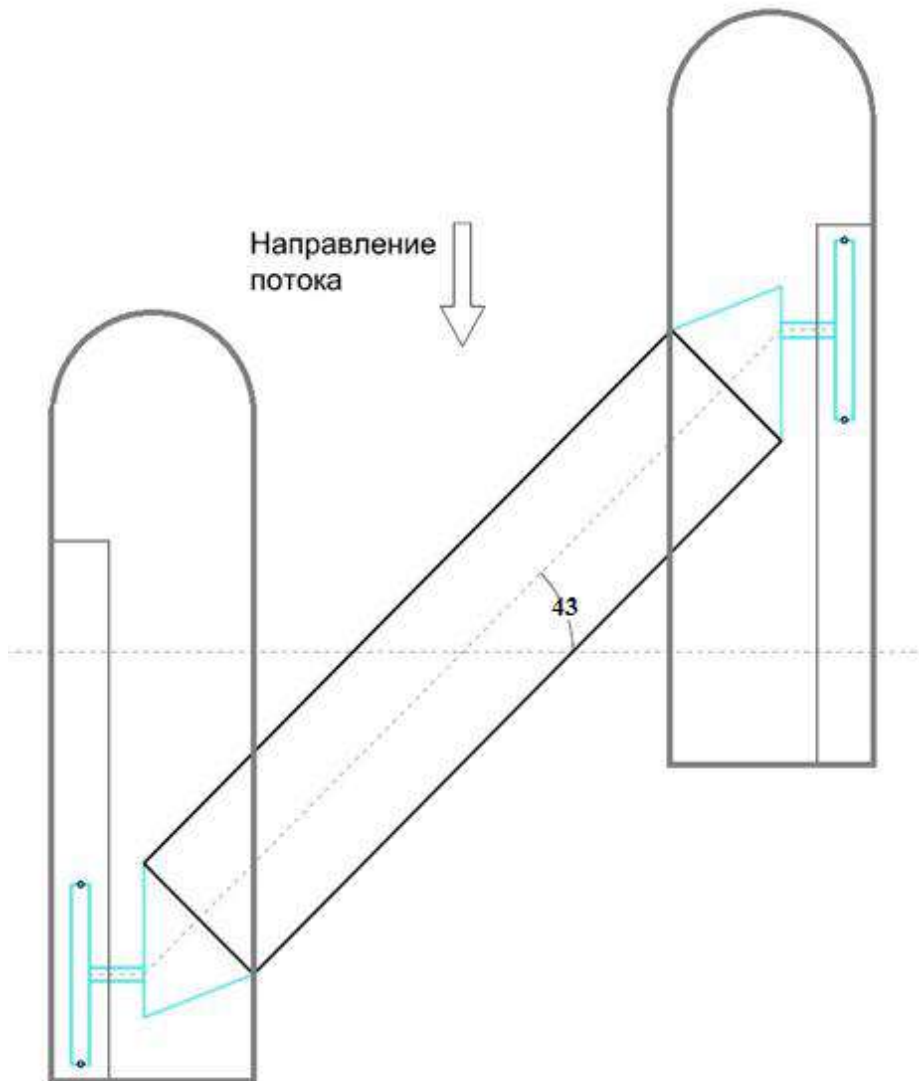


Рисунок 3.45– Расположение модели в специализированном стенде. Угол скольжения 43 градуса

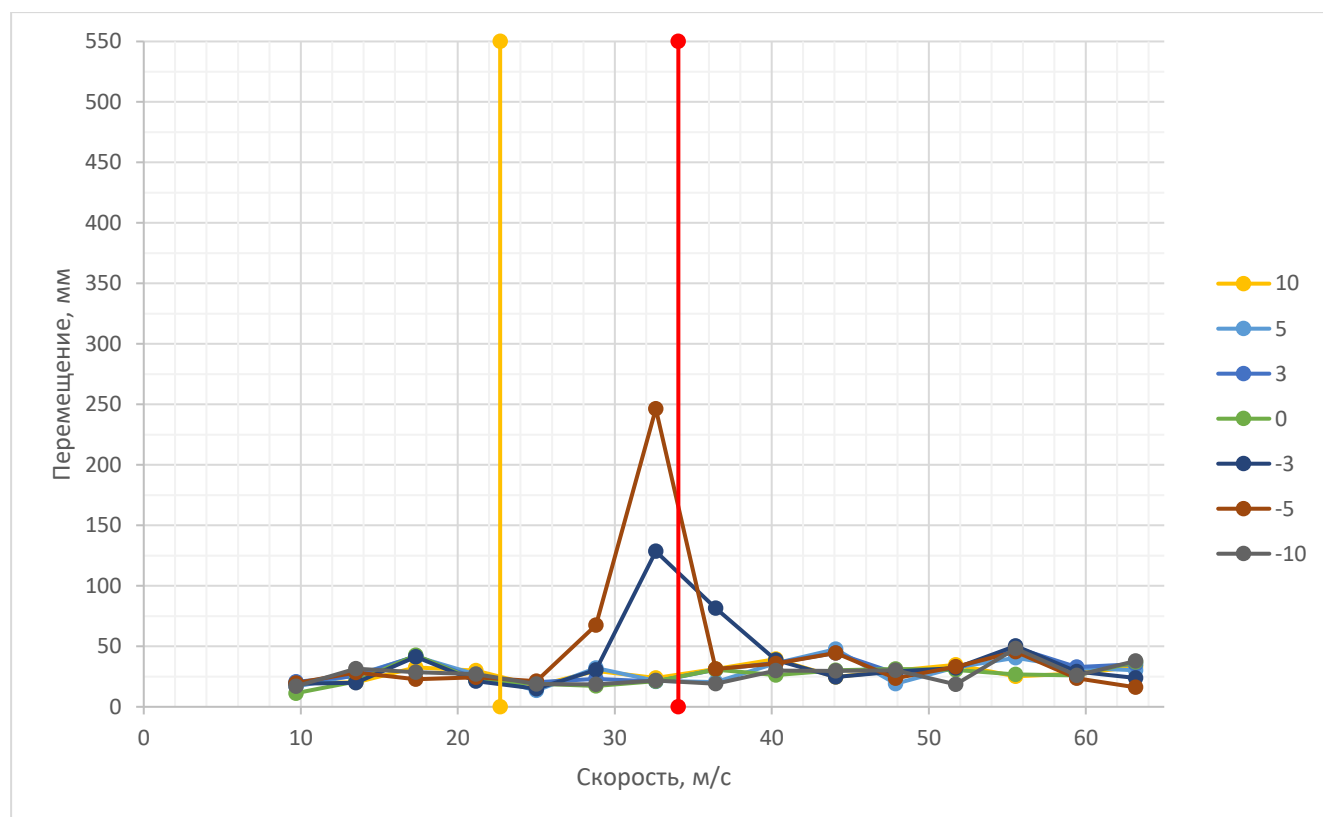


Рисунок 3.46– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, угол скольжения 43°

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 до 250 мм). Тем не менее учитывая нетиповую ориентацию пролетного строения, в особенности относительно основного русла реки, рекомендуется при оценке устойчивости опираться на результаты для наиболее неблагоприятного направления ветрового потока – перпендикулярно оси пролетного строения.

3.2.3. Экспериментальные исследования мостового перехода на стадии монтажа (стадия максимальной надвижки)

Экспериментальные исследования мостовых сооружений на стадии монтажа, в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [18], [19] рекомендуется проводить на полных динамически подобных моделях. Мостовые сооружения на данном этапе, на стадии максимальной надвижки являются наиболее восприимчивыми к ветровому воздействию, в связи с этим надвижку стараются выполнять в промежутки времени с минимальными скоростями ветра (штиль). Тем не менее проведение экспериментальных исследований позволяет расширить данное временное окно за счет определения критической скорости ветра для возникновения того или иного явления аэродинамической неустойчивости.



Рисунок 3.47 – Монтаж пролетного строения методом надвижки

Наиболее существенным отличием в проведении испытаний на полных динамически подобных моделях является необходимость моделирования по критерию Коши (подобие по моментам инерции), а также детальное

моделирование узлов крепления пролетного строения к опорам/пилонам. Впрочем, в отдельных случаях допустима замена узла крепления пролетного строения к опоре на плоские пружинные подвесы, которые позволяют моделировать первую изгибную и первую крутильную форму колебаний консоли. Данный метод позволяет существенно снизить трудоемкость изготовления модели.

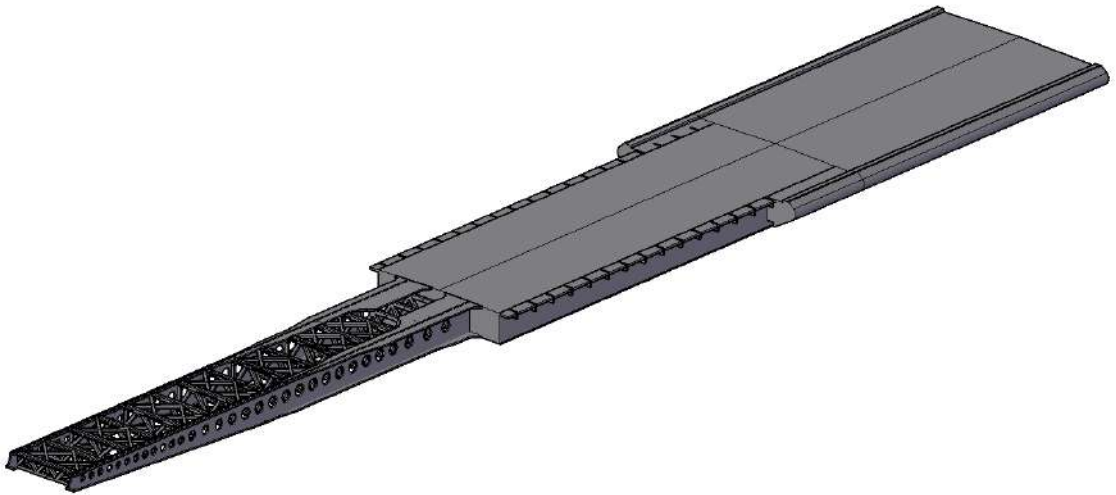


Рисунок 3.48 – Модель моста на стадии строительства

Помимо подобия по критерию Коши, соблюдаются классические для испытаний мостовых сооружений критерии Ньютона, Скруттона и геометрическое подобие.

В качестве измерительного оборудования при проведении испытаний используются лазерные датчики перемещения и акселерометры. Испытания проводятся в два этапа.

На первом этапе выполняется оценка частотных характеристик модели и значения логарифмического декремента затухания колебаний. При необходимости выполняется корректировка массы модели и параметров пружинных узлов.

Далее выполняется основная серия испытаний в равномерном потоке. Испытания проводятся с шагом 15° - 45° по углу скольжения. Измеряемой величиной является амплитуда колебаний конца и середины консоли. Пример

результатов испытаний приведен на рисунке 3.51 (зависимость амплитуды колебаний от скорости ветрового потока).

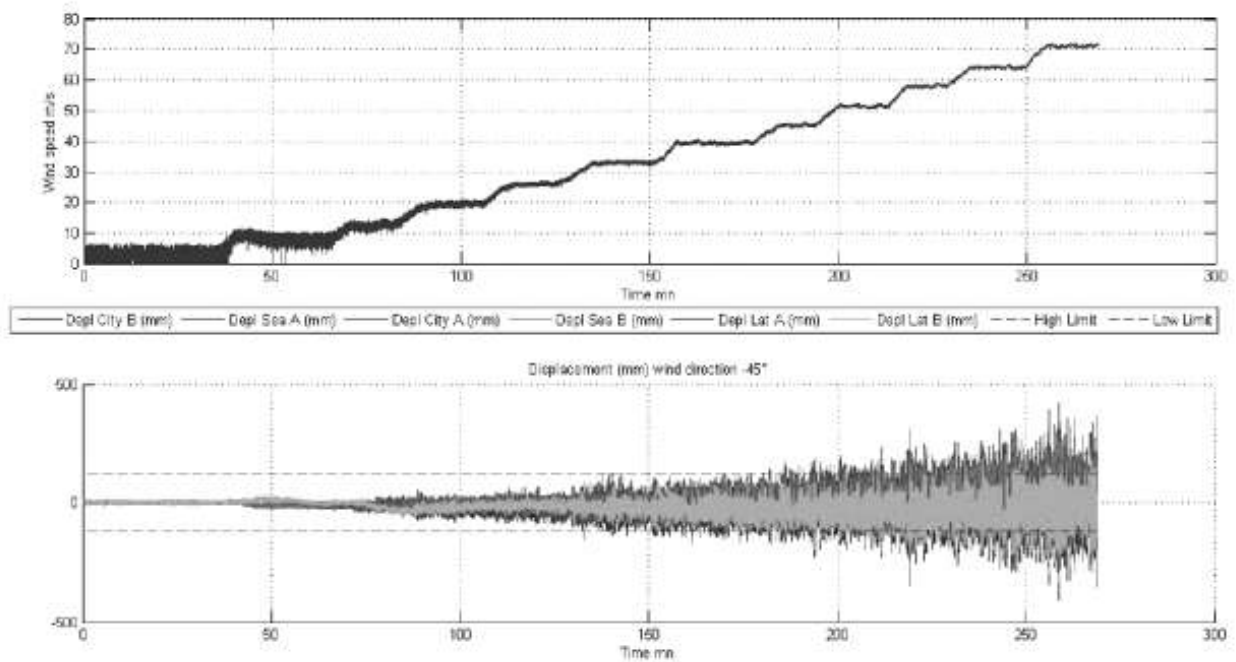


Рисунок 3.49– Амплитуды вертикальных и поперечных колебаний

Далее выполняется сопоставление полученной амплитуды колебаний с предельно допустимыми значениями, определенными в рамках прочностного расчета. В случае превышения предельно допустимых значений на скоростях ветрового потока ниже расчетной, выполняются испытания в турбулентном потоке, с профилем скорости и интенсивности турбулентности ветрового потока, соответствующими условиям площадки застройки.

При необходимости, на основании результатов испытаний проектировщику выдаются рекомендации по корректировке конструкции аванбека (уменьшение или увеличение проницаемости), по использованию аэродинамических обтекателей и др.

3.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ВЕТРОВЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

3.3.1. Апробация методики моделирования ветровых воздействий на объект транспортной инфраструктуры – аэровокзальный комплекс

Постановка задачи

Исследуется ветровое воздействие на аэровокзальный комплекс, находящийся на реконструкции (Рисунок 3.50).



Рисунок 3.50– Исследуемый объект

Проектирование и изготовление модели объекта транспортной инфраструктуры

Учитывая размеры рабочей части аэродинамической трубы, был выбран максимально возможный из условий загромождения потока масштаб макета - 1:200 . Исследуемая модель устанавливалась на автоматизированный поворотный стол, располагающийся в рабочей зоне аэродинамической трубы (Рисунок 3.51). Модель имеет на поверхности точки сбора давления, от каждой такой точки сбора давление передается на дифференциальные датчики давления



Рисунок 3.51– Модель исследуемого объекта

Проведение экспериментальных исследований и результаты

Экспериментальное исследование проведено согласно методике, представленной в Главе 2 настоящей работы. Схема принятых углов атаки ветра представлена на Рисунок 3.52.

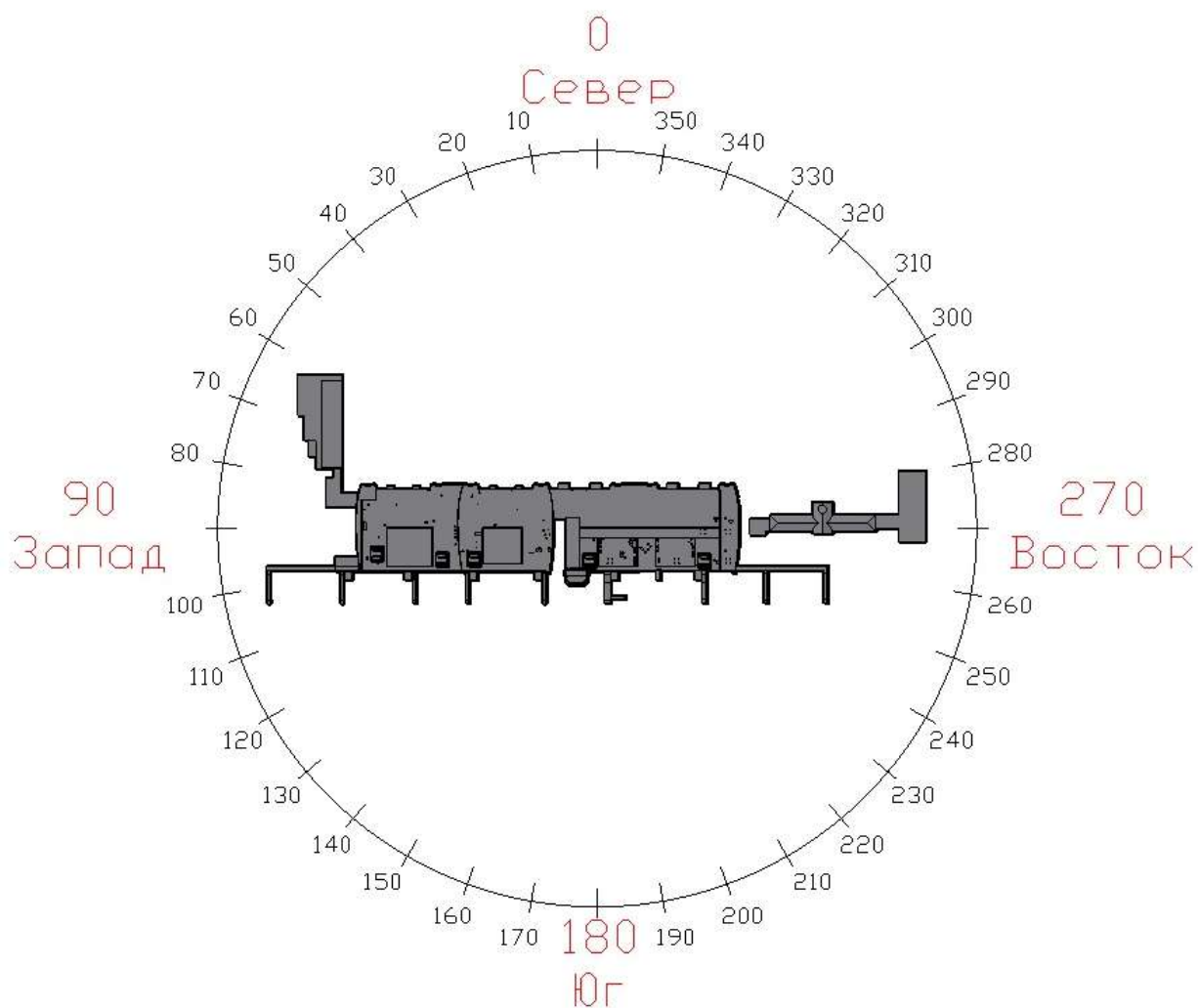


Рисунок 3.52– Схема углов атаки ветрового потока

По результатам испытаний определены аэродинамические коэффициенты C_x , C_y и C_mz . График зависимости аэродинамических коэффициентов от углов атаки представлен на Рисунок 3.53 и Рисунок 3.54.

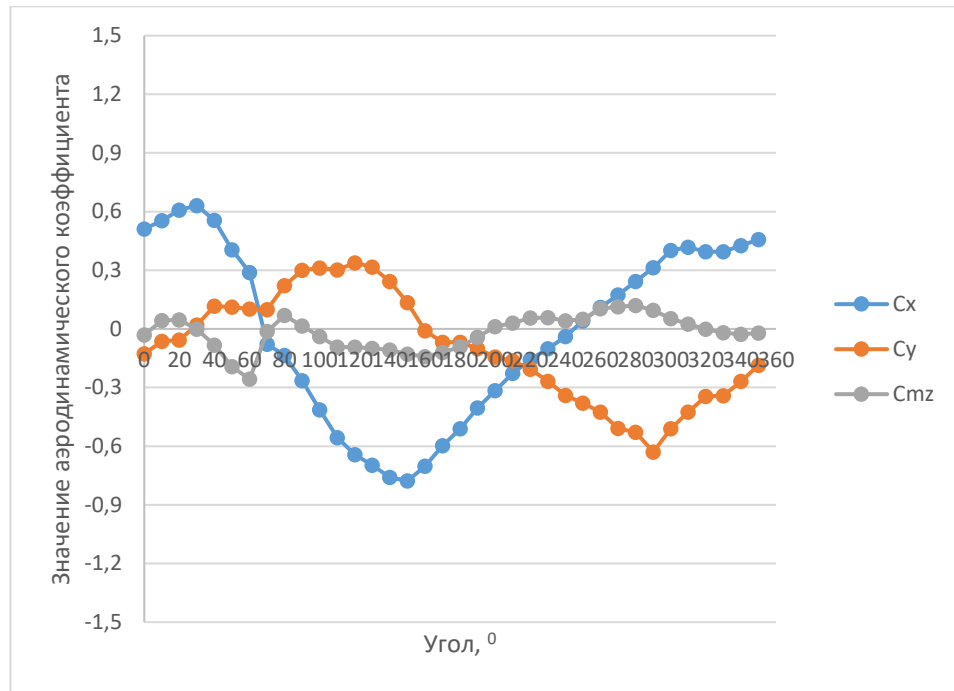


Рисунок 3.53– График зависимости аэродинамических коэффициентов от угла атаки ветра (терминал А)

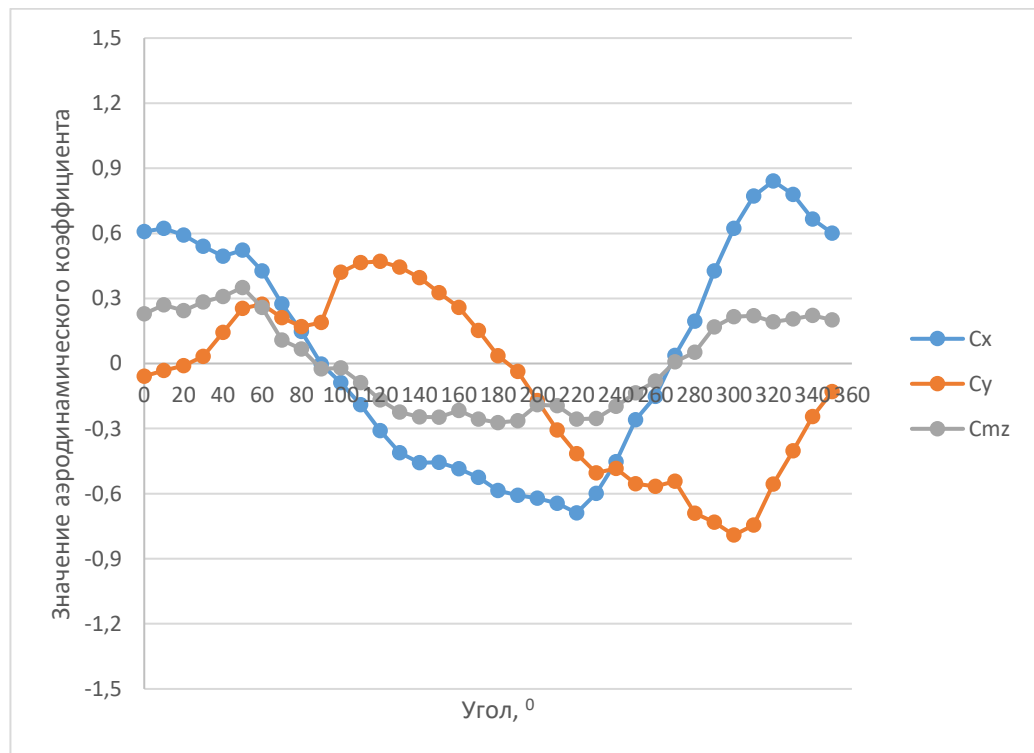


Рисунок 3.54– График зависимости аэродинамических коэффициентов от угла атаки ветра (терминал В)

Оценка интегральной пульсационной составляющей безразмерных компонент аэродинамической силы выполнена на основании анализа данных, полученных в результате измерения интегральных составляющих компонент

аэродинамической силы с частотой 1000 Гц. На основании анализа проектной документации установлено, что высота здания не превышает 40 м, отношение высоты к пролету существенно меньше 1,5, соответственно при оценке интегральной пульсационной составляющей безразмерных компонент аэродинамической силы допускается не учитывать динамический отклик конструкции (коэффициент динамичности) в соответствии с примечанием 1 к п.11.1.8 СП [90]. В качестве контрольных направлений ветрового потока выбраны наиболее неблагоприятные с точки зрения интегральной ветровой нагрузки:

- 30° и 290° - для Терминала А (Рисунок 3.55 и Рисунок 3.56);
- 300° и 320° - для Терминала В (Рисунок 3.57 и Рисунок 3.58).

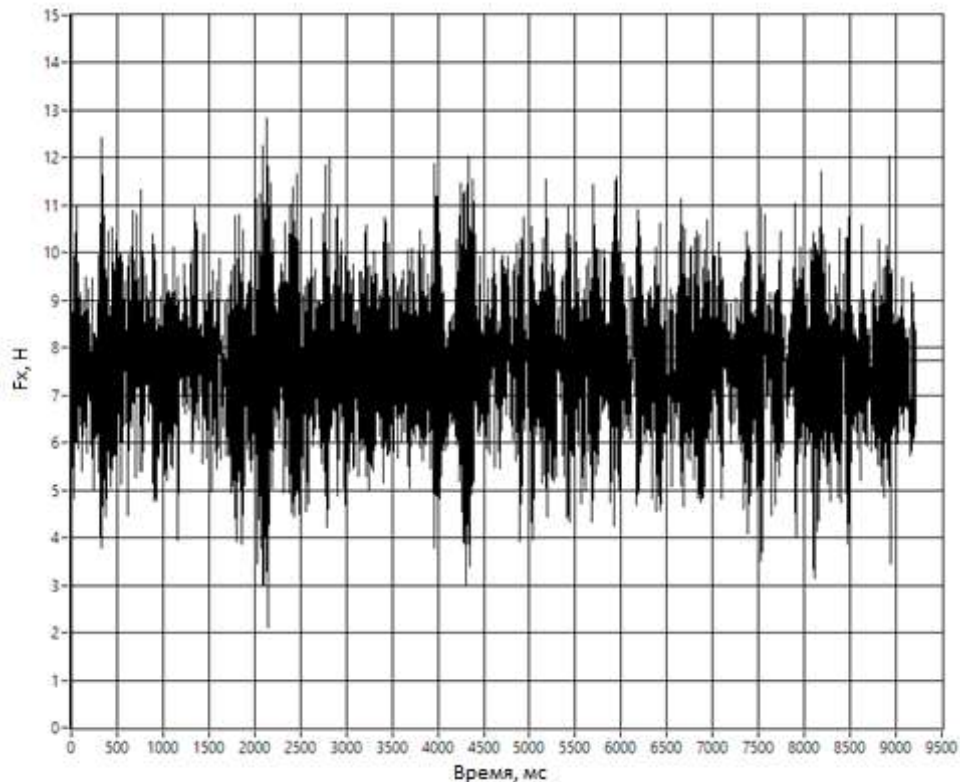


Рисунок 3.55– Зависимость значения силы аэродинамического сопротивления F_x [Н] от времени t [мс], Терминал А

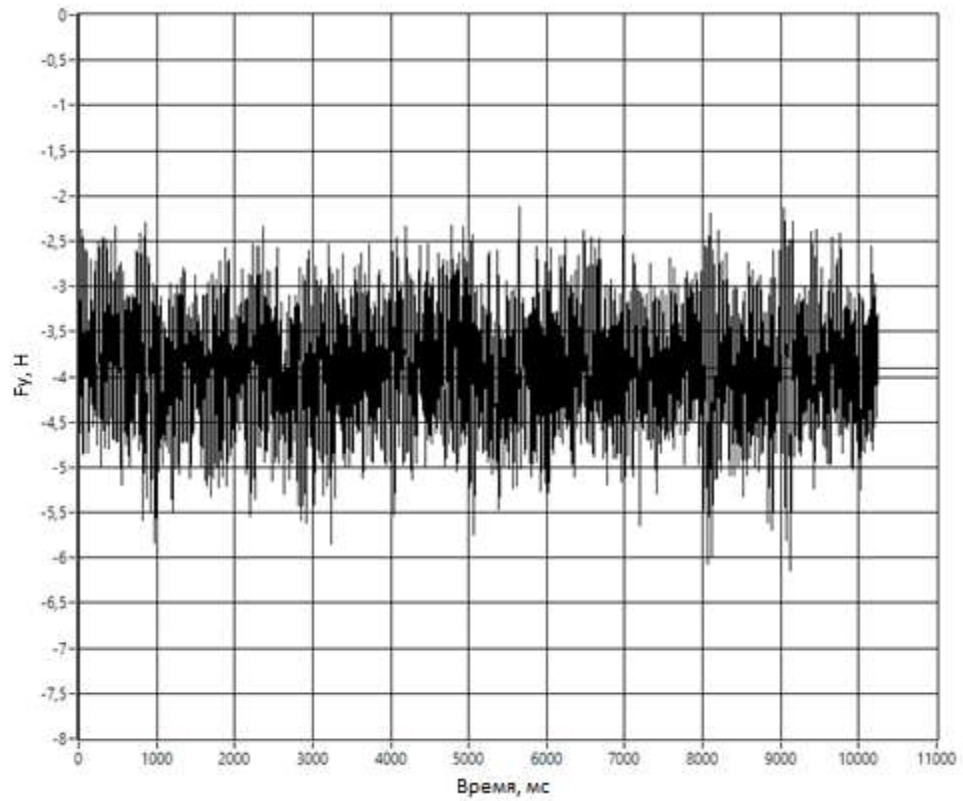


Рисунок 3.56 – Зависимость значения силы аэродинамического сопротивления F_y [Н] от времени t [мс] , Терминал А

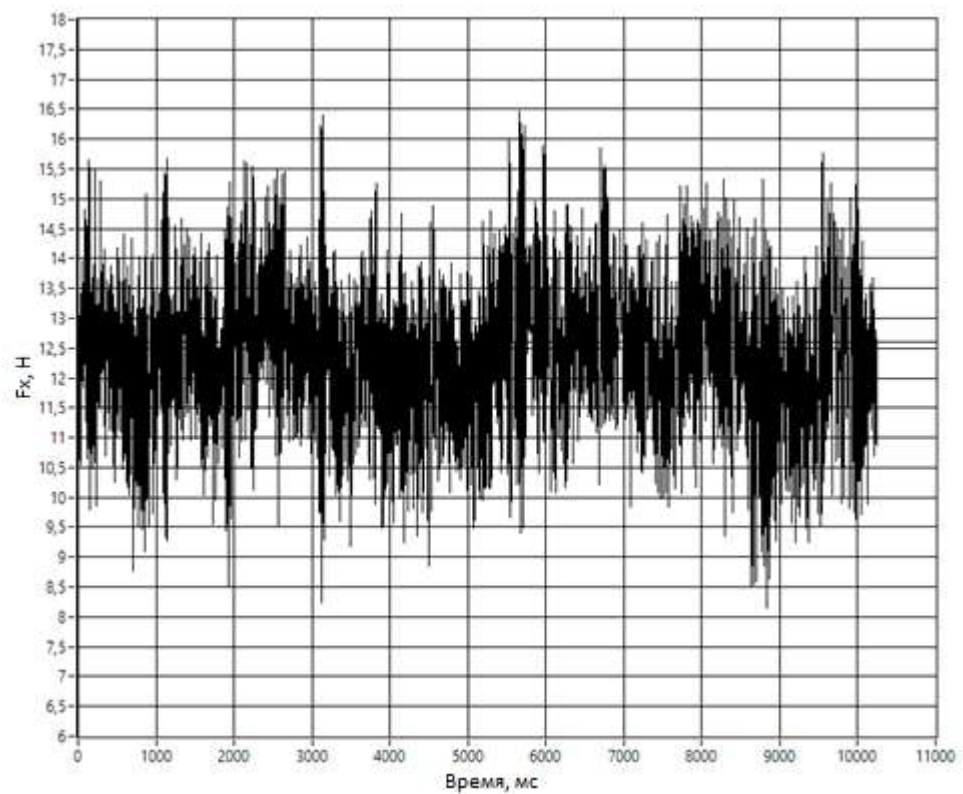


Рисунок 3.57– Зависимость значения силы аэродинамического сопротивления F_x [Н] от времени t [мс], Терминал В

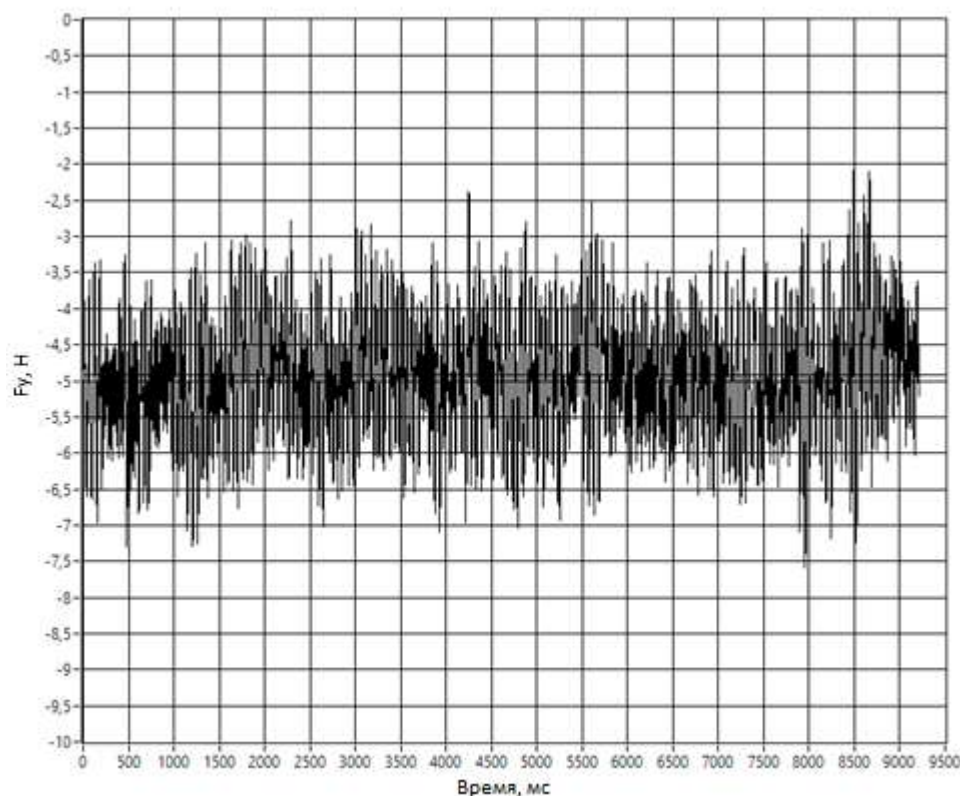


Рисунок 3.58– Зависимость значения силы аэродинамического сопротивления F_y [Н] от времени t [мс] , Терминал В

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

3.3.2. Апробация методики моделирования ветровых воздействий на решетчатую конструкцию

В ходе экспериментального исследования проводятся весовые исследования по определению интегральных аэродинамических характеристик – апробация методики, приведенной в Главе 2 диссертационной работы. Учитывая размеры рабочей части аэродинамической трубы, был выбран максимально возможный из условий загромождения потока масштаб макета - 1:100. Исследуемая модель

устанавливалась на автоматизированный поворотный стол, располагающийся в рабочей зоне аэродинамической трубы (Рисунок 3.59).



Рисунок 3.59– Макет исследуемого объекта в рабочей зоне АДТ

Основной цикл аэродинамических испытаний выполнен при скорости потока $V_{\infty} = 16,5$ м/с, что соответствует зоне автомодельности по числу Рейнольдса. Иными словами, безразмерные аэродинамические коэффициенты масштабной модели, полученные в аэродинамической трубе, идентичны соответствующим величинам в натуральных условиях. В результате экспериментальных исследований получены значения аэродинамических коэффициентов при различных углах атаки ветра (Рисунок 3.60).

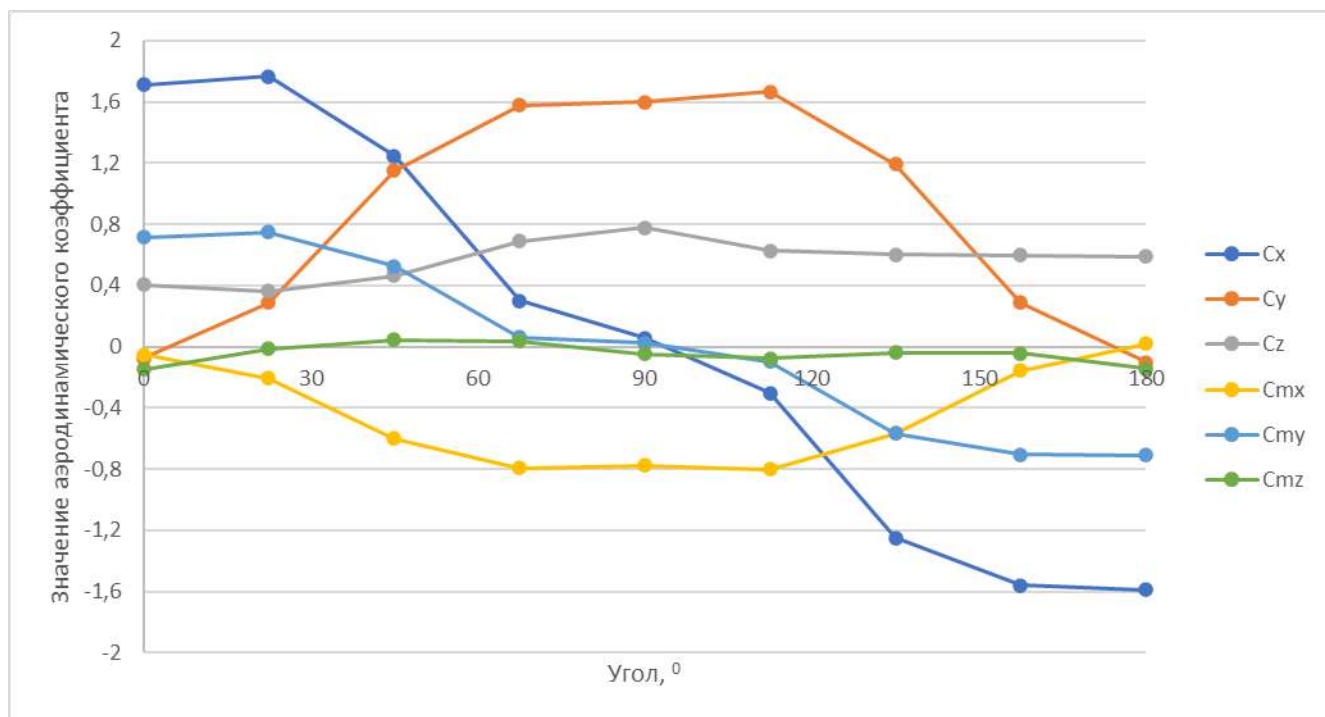


Рисунок 3.60– График зависимости аэродинамических коэффициентов при изменении угла атаки от 0° до 180°

3.3.3. Апробация методики исследования на резонансное вихревое возбуждение

Поскольку исследуемый в п. 3.3.2 объект является решетчатой конструкцией, требование о проверке на резонансное вихревое возбуждение на рассматриваемое сооружение в целом не распространяется.

Тем не менее, для более точной оценки возможности возникновения резонансного вихревого возбуждения в рамках экспериментальных исследований был проведен анализ аэродинамической нагрузки на жесткую модель решетчатой башни с газоотводящим стволом, а также пульсационной составляющей аэродинамического воздействия на объект с целью определения возможности возникновения аэродинамической устойчивости типа резонансное вихревое возбуждение.

В ходе эксперимента на всех скоростях потока были выявлены слабые колебания объекта на частотах, соответствующих собственным частотам измерительной системы (Рисунок 3.61 и Рисунок 3.62). Подобные слабые колебания всегда возникают при проведении физических исследований вследствие невозможности создания в реальности абсолютно жесткой системы и в расчет не принимаются. Анализ остальной части частотного спектра не выявил возникновения характерных колебаний интегральной ветровой нагрузки на модели.

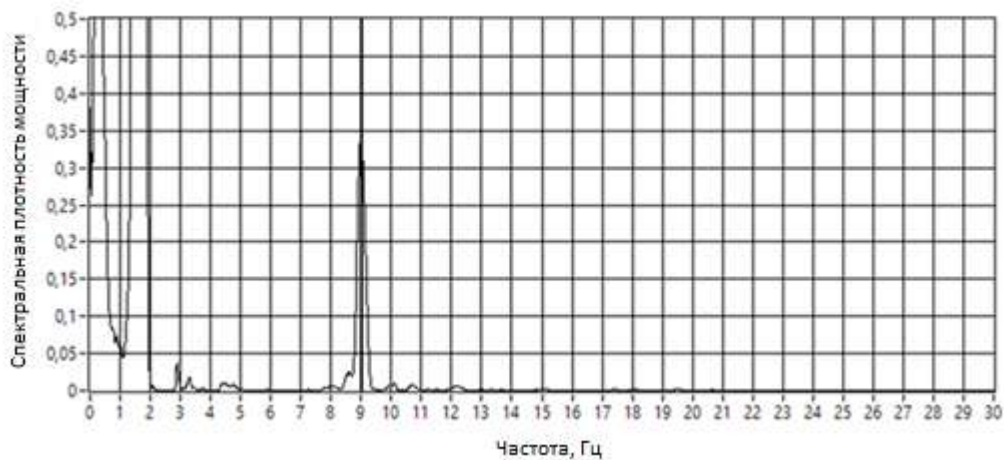


Рисунок 3.61– Спектральная характеристика собственных частот колебаний измерительного стенда

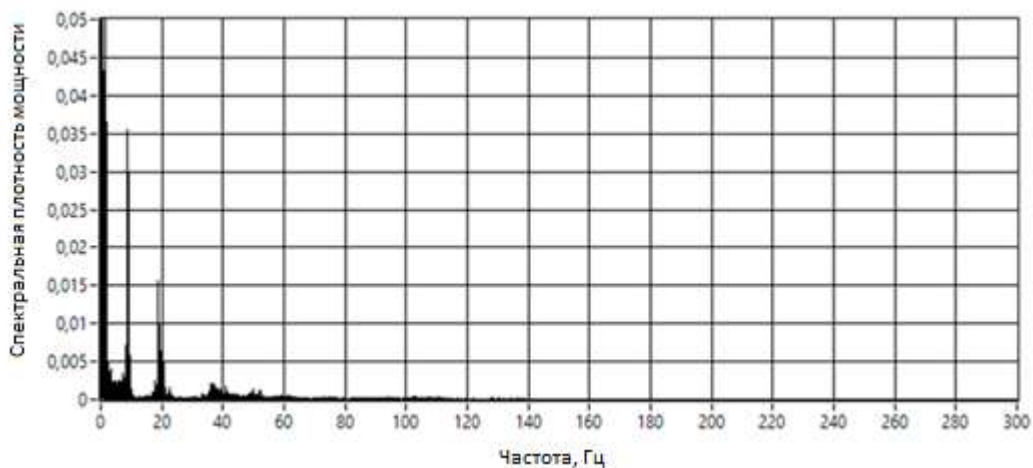


Рисунок 3.62– Спектральная характеристика колебаний интегральной ветровой нагрузки на модели

Также было проведено исследование колебаний срывного потока за моделью. Данное исследование также не выявило, как и предыдущем случае, наличие установившихся колебаний (Рисунок 3.63).

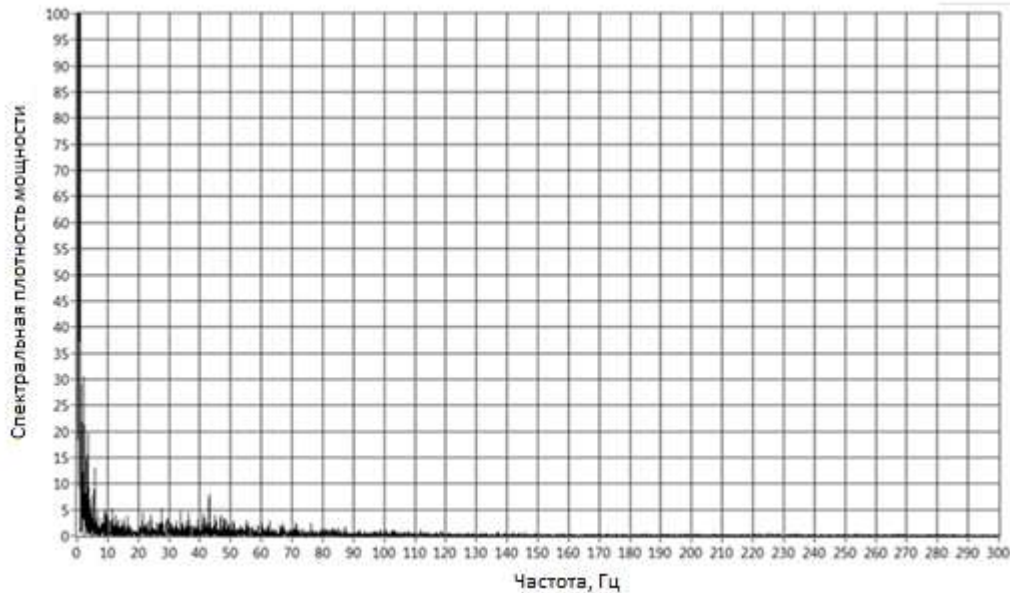


Рисунок 3.63– Спектральная характеристика колебаний срывного потока за моделью

Приведенная методика позволяет как определить значения аэродинамических коэффициентов, необходимых для расчета ветровой нагрузки на конструкцию в целом, так и оценить возможность возникновения вихревого резонансного возбуждения.

В работе предлагается метод оценки возможности возникновения аэроупругой неустойчивости типа вихревой резонанс, основанный на изучении потока за моделью. Данный метод не требует изготовления динамически подобной модели, что существенно облегчает проведение исследования. На основании анализа колебаний интегральной ветровой нагрузки на жесткой модели решетчатой башни с газоотводящим стволом, а также колебаний срывного потока за моделью установлено, что исследуемое сооружение не подвержено эффектам вихревого резонансного возбуждения.

3.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА СНЕГОВЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

3.4.1. Апробация методики моделирования снеговых воздействий на уникальном объекте транспортной инфраструктуры

Постановка задачи

Первая в мире трансграничная канатная дорога Благовещенск–Хэйхэ будет проложена через реку Амур, пограничную водную артерию между восточной частью России и Китаем.

Путешественники смогут совершить поездку из России в Китай за семь с половиной минут. Благовещенский терминал канатной дороги спроектирован с амфитеатром, зимним садом и рестораном. Фасад здания терминала планируется выполнить из двухслойной пропускающей свет оболочки, благодаря чему из огромных окон будет открываться великолепный вид на окрестности (Рисунок 3.64).



Рисунок 3.64– Проект уникальной канатной дороги из Благовещенск–
Благовещенск–Хэйхэ

Для данной задачи схемы распределения снеговой нагрузки будут приняты на основе результатов модельных испытаний в аэродинамической трубе.

Проектирование и изготовление макета конструкции

Для экспериментальных исследований была разработана и изготовлена модель исследуемого объекта (Рисунок 3.65). Учитывая размеры рабочей части аэродинамической трубы, был выбран максимально возможный из условий загромождения потока масштаб макета. Исследуемая модель устанавливалась на автоматизированный поворотный стол, располагающийся в рабочей зоне аэродинамической трубы.



Рисунок 3.65– Модель исследуемого объекта

Проведение экспериментальных исследований закономерностей снегопереноса и снегоотложений на кровельном покрытии исследуемого объекта

Моделирование проводится в соответствии с методикой, представленной в Главе 2 настоящей работы. В эксперименте выполнена полная круговая экспозиция по направлению ветра с шагом 45° .

Результаты фотофиксации картин распределения снегоотложений



Рисунок 3.66– Характерные зоны снеговых отложений, углы набегающего потока 0° (С) и 270° (В)

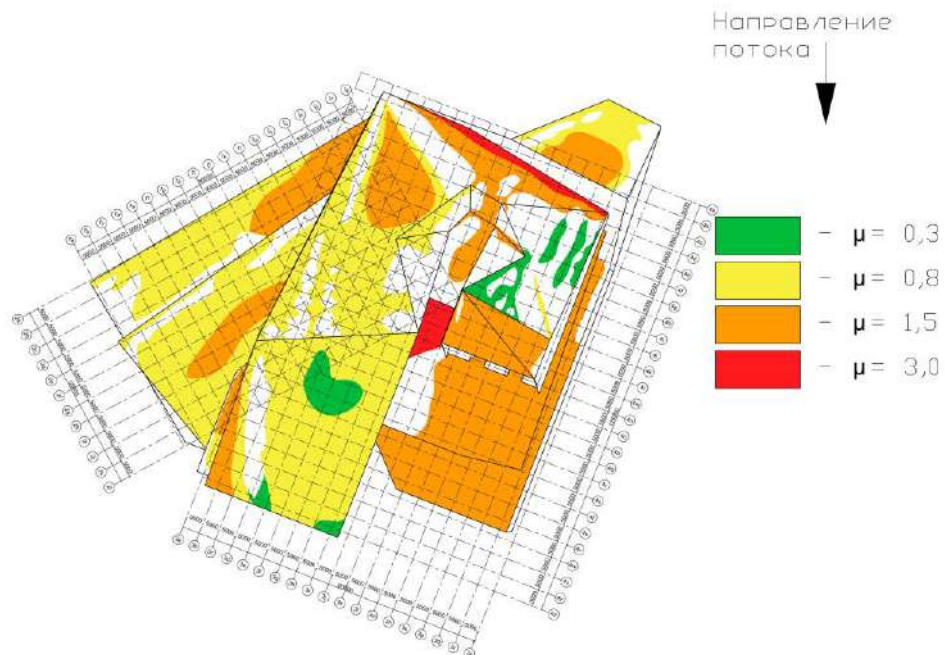


Рисунок 3.67– Характерные зоны снеговых отложений, углы набегающего потока 315° (СВ) и 225° (ЮВ)

Схемы снеговых отложений на поверхности кровли исследуемого объекта

По результатам климатического анализа выявлены характерные направления ветра в зимний период: В (соответствует углу обтекания 270°), СВ (315°) и ЮВ (225°).

Для характерных направлений ветра в зимний период на основании результатов физического моделирования в АДТ составлены схемы снегоотложений для исследуемого объекта транспортной инфраструктуры (Рисунок 3.68).



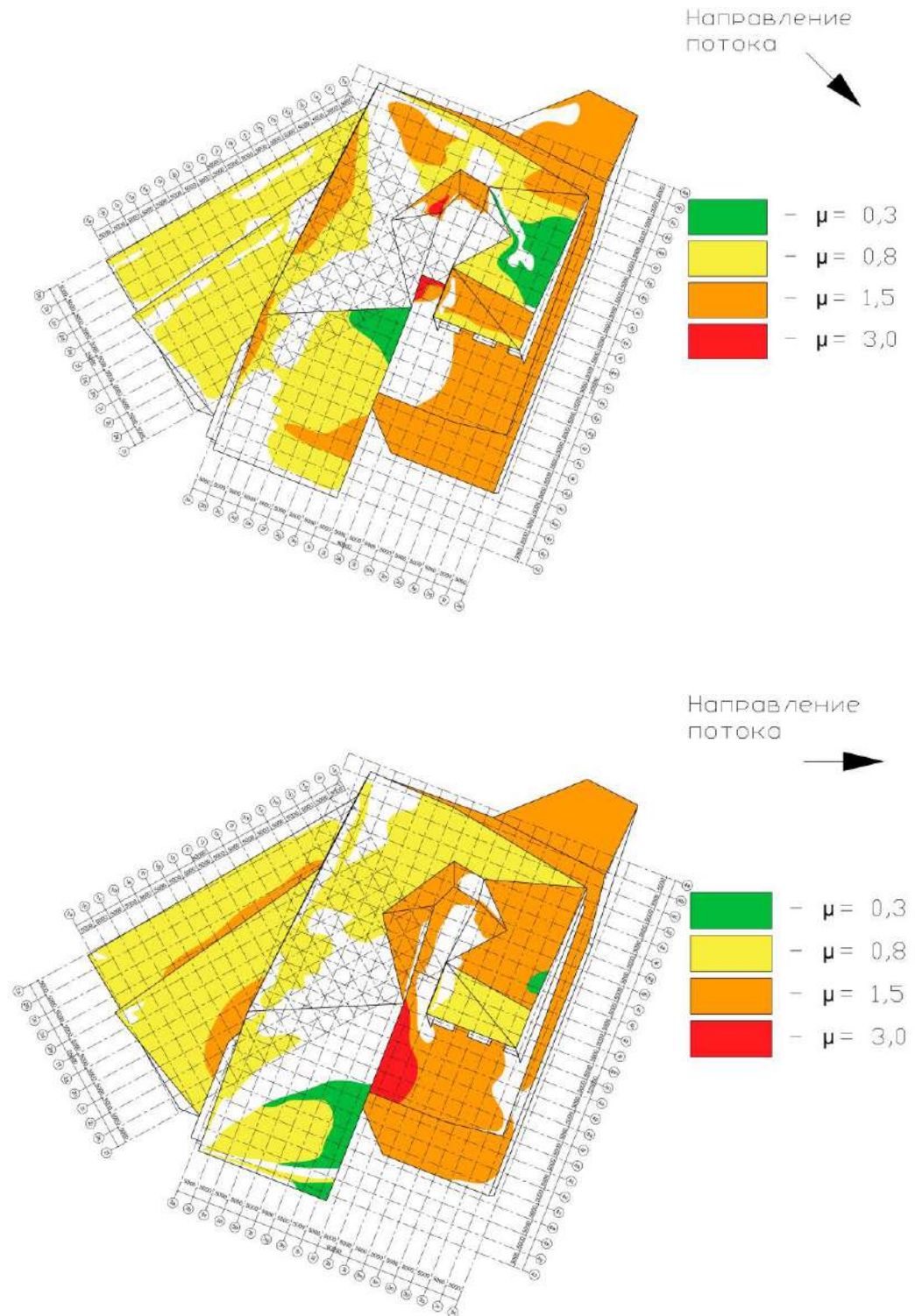


Рисунок 3.68– Схемы снеговых отложений на поверхности кровли исследуемого объекта для различных направлений ветра

По результатам выполненного эксперимента, а также инженерного анализа нормативных схем распределения снеговой нагрузки, представляющих более консервативный подход, основанный на натуральных наблюдениях, выполняется

назначение снеговой нагрузки с учетом преобладающих направлений ветра в районе строительства.

3.4.2. Апробация методики моделирования снеговых воздействий на объекте транспортной инфраструктуры – аэровокзальном комплексе

Моделируются снеговые воздействия на объект транспортной инфраструктуры аэровокзальный комплекс, представленный на Рисунок 3.50.

Моделирование осуществляется по методике, представленной в Главе 2 настоящей работы.

Испытания модели в масштабе 1:200. При обдуве модели с разных направлений, моделируется ветровое влияние на снегоперенос в соответствии с розой ветров для данного региона. В эксперименте выполнена полная круговая экспозиция по направлению ветра с шагом 45° . Данного количества направлений ветрового потока достаточно для проектирования исследуемой конструкции с заданной надежностью.

Результаты фотофиксации картин снегопереноса для нескольких углов атаки представлены на Рисунок 3.69–Рисунок 3.75.



Рисунок 3.69– Характерная картина снегопереноса, угол набегающего потока 0° (Терминал А)



Рисунок 3.70– Характерная картина снегопереноса, угол набегающего потока 45° (Терминал А)



Рисунок 3.71– Характерная картина снегопереноса, угол набегающего потока 90° (Терминал А)

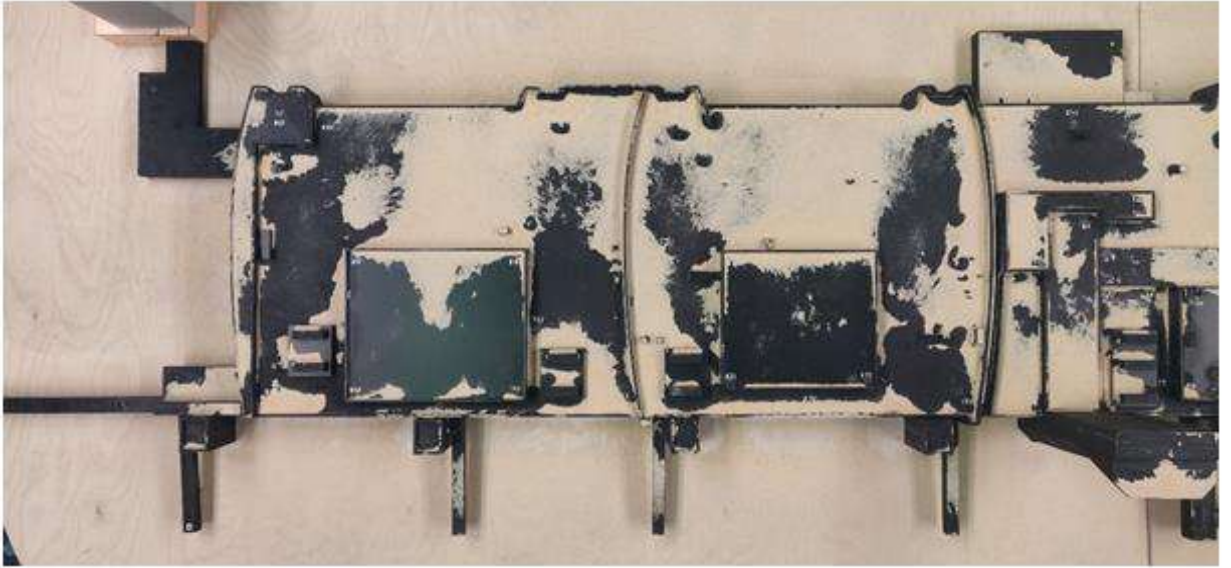


Рисунок 3.72– Характерная картина снеготеноса, угол набегающего потока 180° (Терминал А)



Рисунок 3.73– Характерная картина снеготеноса, угол набегающего потока 45° (Терминал В)

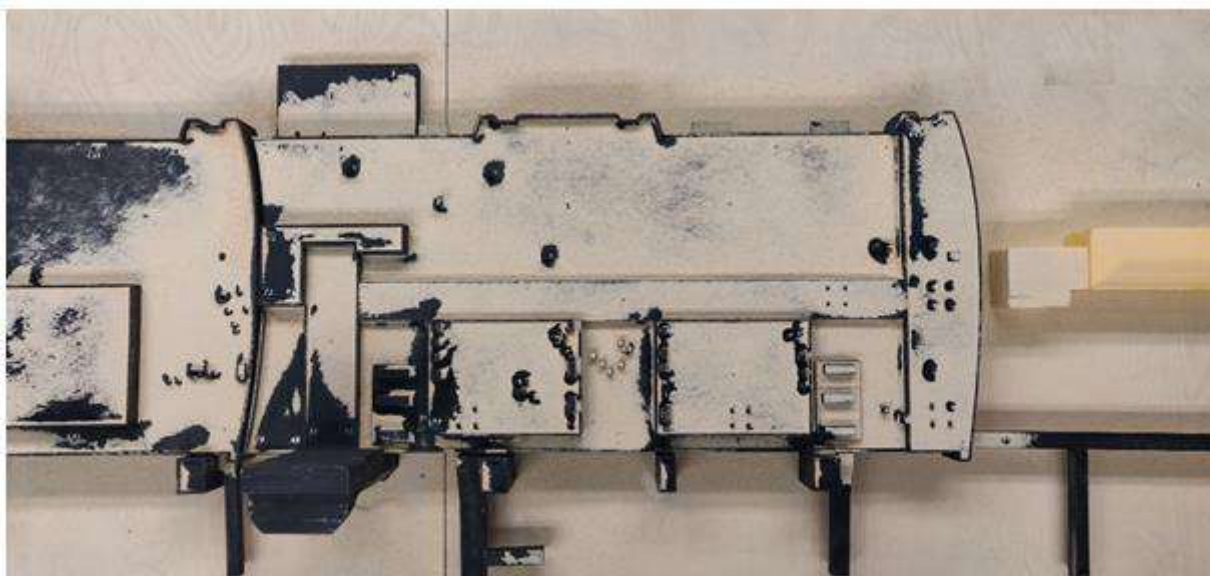


Рисунок 3.74– Характерная картина снегопереноса, угол набегающего потока 90° (Терминал В)

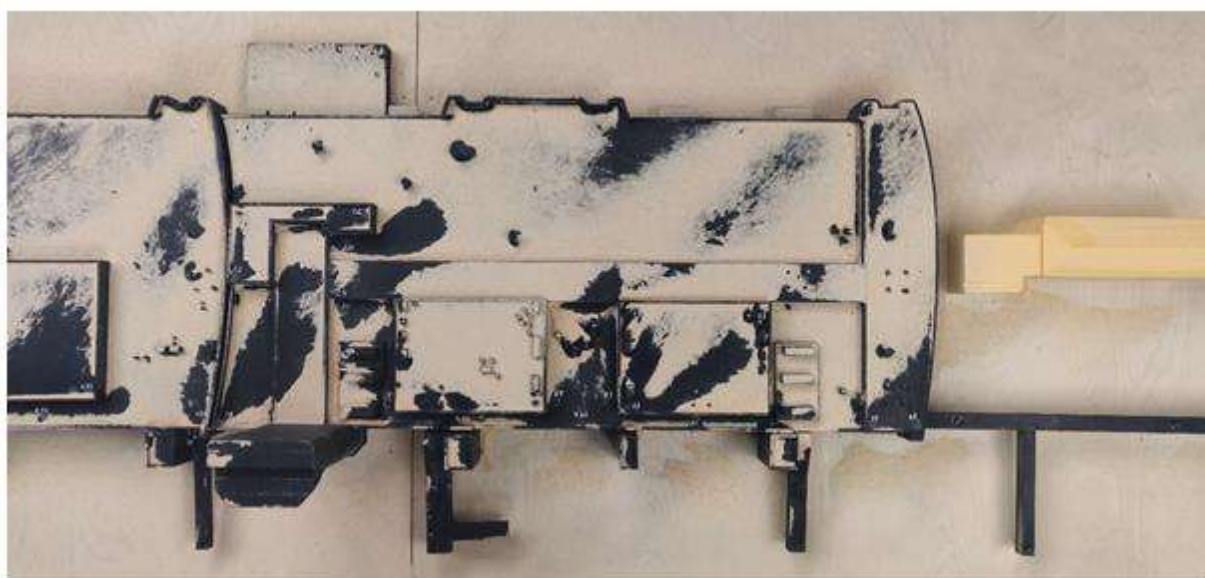


Рисунок 3.75– Характерная картина снегопереноса, угол набегающего потока 135° (Терминал В)

Для всех рассматриваемых направлений по результатам серии аэродинамических испытаний составлены схемы распределения нормативной снеговой нагрузки (без учета коэффициента надежности) при изменении угла ветра от 0 до 315 градусов с шагом 45 градусов.

Схема направлений набегающего потока при проведении экспериментальных исследований представлена на Рисунок 3.52. На основании

анализа результатов экспериментальных исследований построена огибающая схема снегопереноса на поверхности кровли исследуемого объекта с учетом всех рассматриваемых направлений ветрового потока.

На основании анализа полученных результатов установлено, что реконструкция терминала В не оказывает существенного влияния на снегоперенос на покрытие терминала А.

Огибающая схема распределения снеговой нагрузки, полученная на основании оценки результатов исследований по всем рассматриваемым направлениям изменяется незначительно (Рисунок 3.76 и Рисунок 3.77).

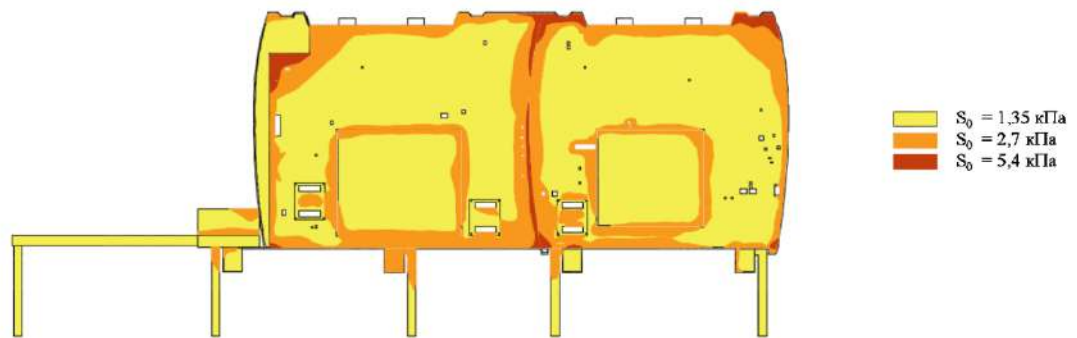


Рисунок 3.76– Огибающая схема распределения снеговой нагрузки на поверхности кровли исследуемого объекта (Терминал А) до реконструкции терминала В

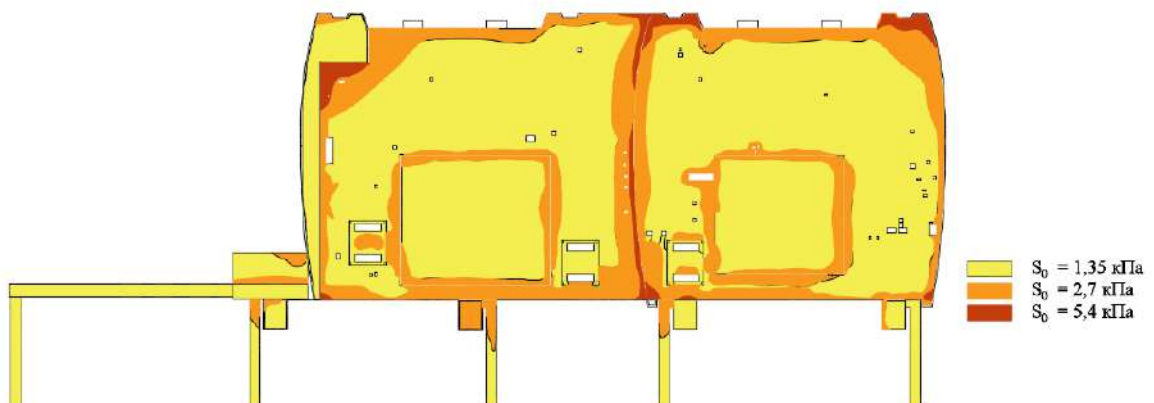


Рисунок 3.77– Огибающая схема распределения снеговой нагрузки на поверхности кровли исследуемого объекта (Терминал А) после реконструкции терминала В

По результатам выполненного эксперимента, а также инженерного анализа нормативных схем распределения снеговой нагрузки, представляющих более консервативный подход, основанный на натуральных наблюдениях, выполняется назначение снеговой нагрузки с учетом преобладающих направлений ветра в районе строительства.

3.5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 3

Данный раздел посвящен апробированию разработанной в главе 2 методики проведения теоретико-экспериментального моделирования на конкретных примерах критически важных объектов транспортной инфраструктуры.

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, температурные воздействия, воздействия агрессивных сред в различном агрегатном состоянии, переносимых ветровыми потоками), в его основе лежат экспериментальные и аналитические вычислительные схемы.

Сформулированы и расчетно подтверждены положения оптимизации предложенного подхода, например, требуется сопоставление полученной амплитуды колебаний с предельно допустимыми значениями, определенными в рамках прочностного расчета.

На основании результатов проведенных испытаний проектировщику выдаются рекомендации по корректировке конструкции объекта транспортной инфраструктуры и отдельных ее элементов, по использованию аэродинамических обтекателей и др.

Приведенная методика позволяет не только определить значения аэродинамических коэффициентов, но и оценить возможность возникновения

вихревого резонансного возбуждения. Предложенный метод оценки возможности возникновения аэроупругой неустойчивости типа вихревого резонанса, основанный на изучении потока за моделью, позволяет избежать изготовления динамически подобной модели, что существенно ускоряет изыскания в период выполнения проектных работ.

Для зданий с протяженными кровельными покрытиями по результатам серии испытаний составлены схемы распределения снеговой нагрузки при изменении угла ветра от 0 до 315 градусов с шагом 45 градусов.

Выполнена оценка возникновения явления аэроупругой неустойчивости типа бафтинг 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, различной проницаемости защитных экранов, а также различной величины логарифмического декремента затухания колебаний.

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

4. ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД ВЕРИФИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В основе инженерного метода верификации результатов теоретико-экспериментального моделирования лежит сопоставление данных, полученных в результате экспериментальных исследований и результатов инженерных и аналитических расчетов. Следует отметить, что большинство существующих общепринятых инженерных и аналитических методик, которые лежат в основе нормативной документации, опираются на результаты многолетних натурных наблюдений (мониторинга). Соответственно, в данной главе для верификации подходов и методик по моделированию природных воздействий на критически важные объекты транспортной инфраструктуры будут применяться как аналитические расчеты ключевых параметров ветрового и снегового воздействия, так и данные натурных наблюдений.

4.1. ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО МОСТОВОГО СООРУЖЕНИЯ

4.1.1. Оценка возможности возникновения вихревого возбуждения и определение его параметров

Существующие инженерные методики оценки аэродинамической устойчивости мостовых сооружений в большинстве своем предполагают расчет критической скорости возникновения различных явлений аэродинамической неустойчивости (вихревое возбуждение, галопирование, флаттер и дивергенция) [19], [90]. Автору также известно о ряде методик аналитического расчета

амплитуды колебаний пролетного строения [19]. С точки зрения верификации оптимальным подходом является сравнение критической скорости вихревого возбуждения. Данный подход основан на широкой подборке натуральных наблюдений за большепролетными мостовыми сооружениями. Прочие явления аэродинамической неустойчивости приводят к полному разрушению пролетного строения и на практике встречаются значительно реже. Аналитические методики расчета амплитуды колебаний имеют сложный математический аппарат и на настоящий момент недостаточно обоснованы.

Инженерный подход к определению критической скорости вихревого возбуждения подробно изложен в [19] и [36]. Данный подход сводится к расчету по формуле (1.1).

В качестве примера проведем верификацию экспериментального моделирования на примере оценки аэродинамической устойчивости пролетного строения со следующими параметрами:

- длина центрального пролета – 130 м;
- ширина центрального пролета – от 15,77 м;
- максимальный высотный (подмостовой) габарит – 18 м;
- характерная высота поперечного сечения элемента поперек ветрового потока – 4,4 м;
- собственная частота изгибных колебаний – 0,68 Гц;
- собственная частота крутильных колебаний – 3,38 Гц.

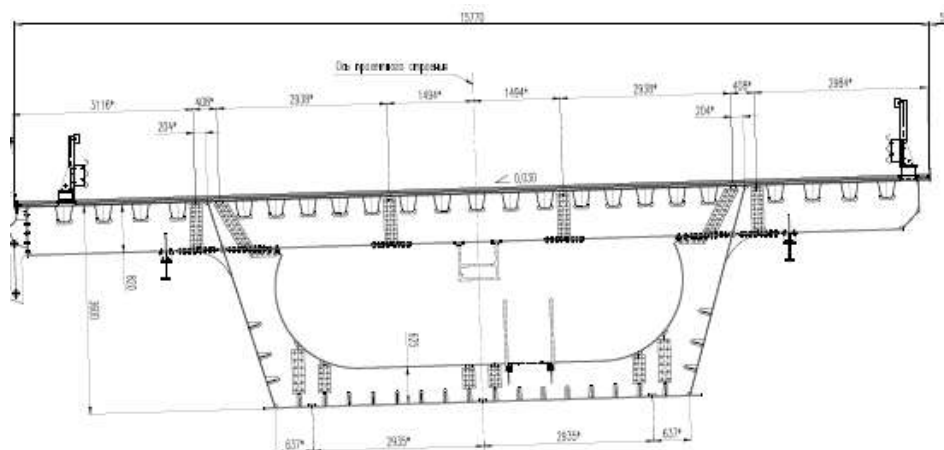


Рисунок 4.1– Типовая схема поперечного сечения моста

Выполним аналитический расчет критической скорости вихревого возбуждения для данного пролетного строения по формуле (1.1):

$$U^{кр} = \frac{fH}{Sh} = \frac{0,68 * 4,4}{0,15} = 19,9 \text{ м/с} \quad (4.1)$$

где Sh – число Струхаля для проектного соотношения B/H , полученное на основании графика на Рисунок 1.18.

Результаты испытаний на секционной модели в соответствии с методикой, описанной в Главе 2, представлены на Рисунок 4.2 в графической форме.

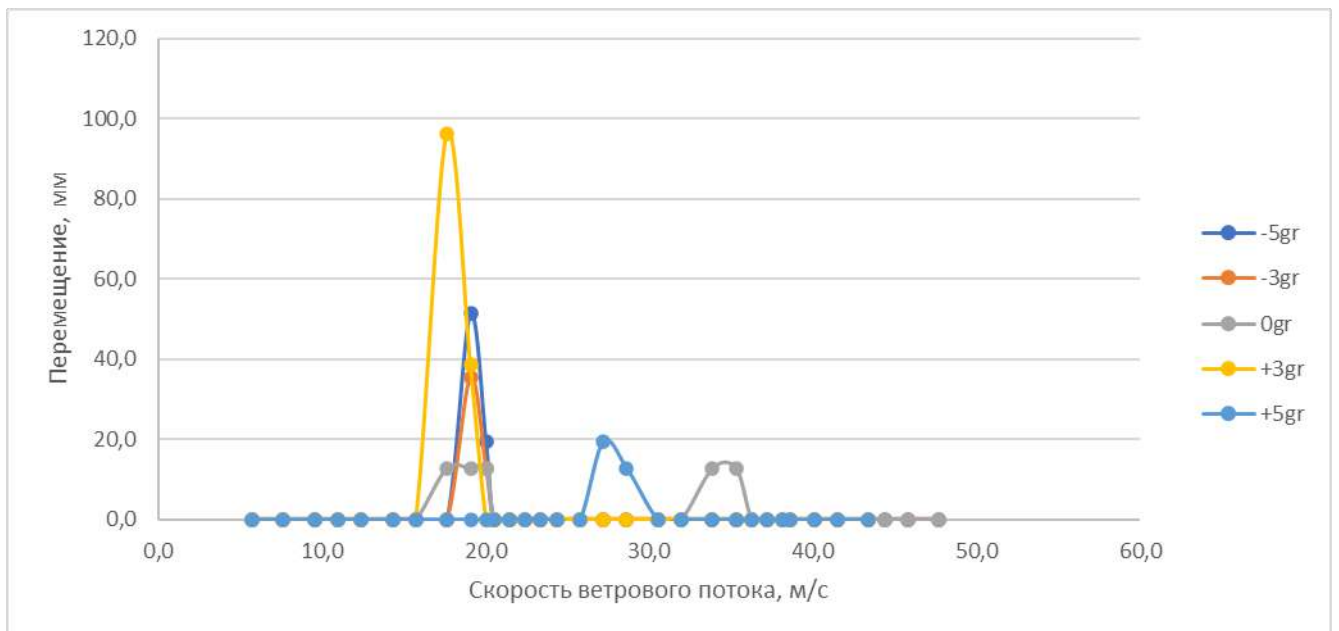


Рисунок 4.2– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения от скорости ветрового потока

На основании результатов экспериментальных исследований для исследуемого пролетного строения, получено значение критической скорости вихревого возбуждения порядка 20 м/с.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждаются аналитическими расчетами как качественно (подтверждено наличие явления аэродинамической неустойчивости типа вихревое возбуждение), так и количественно.

4.1.2. Оценка возможности возникновения изгибно-крутильного флаттера

Аналитически выполнена предварительная оценка критической скорости флаттера на основании теории Теодорсена, разработанной в 1935 г для нужд авиации [211]. Методика приведена во второй редакции проекта [19], однако в сам документ [19] не вошла.

В качестве верификация выбрано пролетное строение со следующими параметрами (Рисунок 4.3):

- длина центрального пролета– 254
- ширина центрального пролета – от 24,4 м.
- максимальный высотный (подмостовой) габарит - 26 м (при проектном уровне воды в реке).
- характерная высота поперечного сечения элемента 2,85 м
- характерная ширина поперечного сечения ПС 27 м;
- погонная масса 25900 кг/м;
- собственная частота крутильных колебаний 0,53 Гц;
- собственная частота вертикальных изгибных колебаний 0,33 Гц.

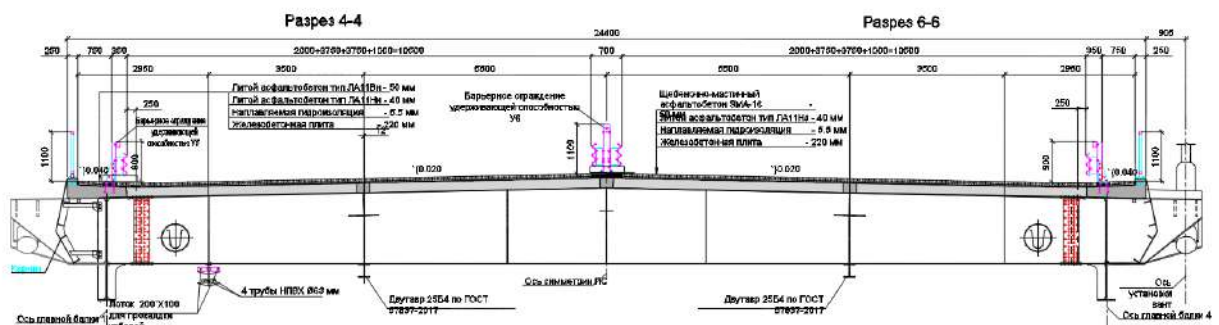


Рисунок 4.3– Типовая схема поперечного сечения моста

На предварительном шаге для выбранной конструкции оценивается критическая скорость флаттера исследуемой конструкции по эмпирической формуле Сельберга-Скрутона

$$\bar{U}^{\text{фл}} = \frac{k_e}{2\pi} \sqrt{\frac{mr}{\rho B^3} \left(1 - \left(\frac{\omega_{\text{изг}}}{\omega_{\text{кр}}} \right)^2 \right)} \quad (4.2)$$

где $\bar{U}^{\text{фл}}$ – безразмерная приведенная скорость флаттера; m – погонная масса, кг/м; r – радиус инерции сечения, м; ρ – плотность воздуха, кг/м³; B – ширина сечения, м; $\omega_{\text{изг}}$ – круговая частота собственных колебаний в вертикальной плоскости, рад/сек; $\omega_{\text{кр}}$ – круговая частота собственных крутильных колебаний, рад/сек; k_e – эмпирический коэффициент, принимаемый в зависимости от соотношения собственных частот колебаний мостового сооружения по Таблица 4.1.

Таблица 4.1– Значения коэффициента k_e

$\frac{\omega_{\text{изг}}}{\omega_{\text{кр}}}$	k_e
$\leq 0,4$	3,72
0,45	4
0,5	4,5
0,7	0,7
0,8 – 1,0	6

Формула (4.2) не учитывает нестационарность процессов обтекания и действительная только при $\frac{\omega_{\text{изг}}}{\omega_{\text{кр}}} < 1$. Данная формула предназначена для тонкой плоской пластины, подобные тела более склонны к возникновению изгибно-крутильного флаттера, чем плохообтекаемые мостовые конструкции и имеют более низкие критические скорости ветра. Полученные критические скорости ветра свыше 100 м/с практически гарантируют ненаступление явление изгибно-крутильного флаттера на территории Российской Федерации при любых условия.

Расчет критической скорости флаттера выполняется итерационно. Задается первоначальное значение приведённой частоты флаттера по формуле

$$\bar{S} = \frac{0,85 \left(1 + \frac{\omega_{\text{изг}}}{\omega_{\text{кр}}} \right)}{\frac{mr}{\rho B^3} \left(1 + \left(\frac{\omega_{\text{изг}}}{\omega_{\text{кр}}} \right)^2 \right)} = 1,052. \quad (4.3)$$

Далее принимается редуцированный коэффициент η Клэппеля по графикам (Рисунок 4.4) для перехода от тонкой пластины к мостовым поперечным сечениям в зависимости от соотношения частот колебаний конструкции. Для выбранной конструкции $\eta=0,42$.

Сама функция Теодорсена имеет вид

$$C(k) = F(k) + iG(k), \quad (4.4)$$

где $k = \frac{\bar{s}}{2}$, $F(k)$ и $G(k)$ – действительное и мнимое значения функции Теодорсена, определяются по Таблица 4.2.

Таблица 4.2– Функция Теодорсена и связанные с ней величины

k	$1/k$	F	$-G$	$-G/k$	$2F/k^2$
∞	0	0,5	0	0	0
10	0,1	0,5006	0,0124	0,00248	0,010012
6	0,16667	0,5017	0,0206	0,00686	0,02787
4	0,25	0,5037	0,0305	0,01525	0,06296
3	0,33333	0,5063	0,04	0,02667	0,1125
2	0,5	0,5129	0,0577	0,0577	0,2565
1,5	0,66667	0,521	0,0736	0,0948	0,4631
1,2	0,83333	0,53	0,0877	0,1462	0,7361
1	1	0,5394	0,1003	0,2006	1,0788
0,8	1,25	0,5541	0,1165	0,2912	1,7316
0,66	1,51516	0,5699	0,1308	0,3964	2,6166
0,6	1,66667	0,5788	0,1378	0,4593	3,2156
0,56	1,78572	0,5857	0,1428	0,51	3,7353
0,5	2	0,5979	0,1507	0,6028	4,7832
0,44	2,27273	0,613	0,1592	0,7236	6,3326
0,4	2,5	0,625	0,165	0,825	7,8125
0,34	2,94118	0,6469	0,1738	1,022	11,192

0,3	3,33333	0,665	0,1793	1,195	14,778
0,24	4,16667	0,6989	0,1862	1,552	24,267
0,2	5	0,7276	0,1886	1,886	36,38
0,16	6,25	0,7628	0,1876	2,345	59,592
0,12	8,33333	0,8063	0,1801	3,002	111,99
0,1	10	0,832	0,1723	3,446	166,4
0,08	12,5	0,8604	0,1604	4,01	268,9
0,06	16,66667	0,892	0,1426	4,753	495,6
0,05	20	0,909	0,1305	5,22	727,2
0,04	25	0,9267	0,116	5,8	1158,3
0,025	40	0,9545	0,0872	6,976	3054,4
0,01	100	0,9824	0,0482	9,64	19648
0	∞	1	0	∞	∞

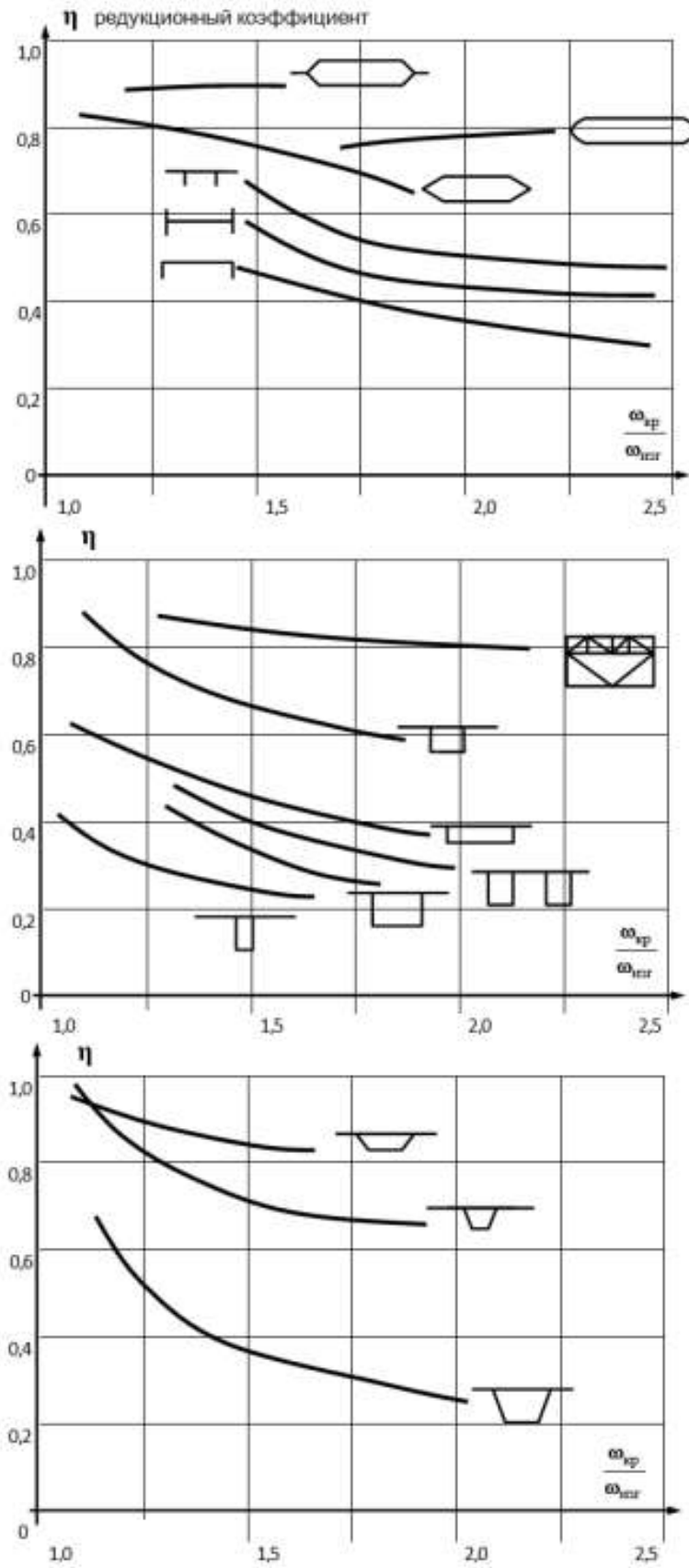


Рисунок 4.4– Зависимость редуцированного коэффициента Клёппеля от соотношения собственных частот колебаний

Значения функции Теодорсена для выбранного ПС представлено в Таблица 4.3.

Таблица 4.3– Значения функции Теодорсена для выбранного ПС

k	$1/k$	F	$-G$	$-G/k$	$2F/k^2$
0,52604	1,90101	0,5	0,59261	0,147272	0,56253

Вычисляются нестационарные аэродинамические коэффициенты-функции (производные флаттера) A_i^* и H_i^*

$$\begin{aligned}
 A_1^* &= \frac{\pi F(k)}{8k} = 0,442395085 \\
 A_2^* &= -\frac{\pi}{32} \left[\frac{1}{k} - \frac{F(k)}{k} - \frac{2G(k)}{k^2} \right] = -0,181018227 \\
 A_3^* &= \frac{\pi}{16} \left[\frac{F(k)}{k^2} - \frac{2G(k)}{k} \right] = 0,452560499 \\
 H_1^* &= -\frac{\pi F(k)}{2k} = -1,769580341 \\
 H_2^* &= -\frac{\pi}{8} \left[\frac{1}{k} + \frac{F(k)}{k} + \frac{2G(k)}{k^2} \right] = -0,768976786 \\
 H_3^* &= -\frac{\pi}{4} \left[\frac{F(k)}{k^2} - \frac{2G(k)}{k} \right] = -1,810241997
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Далее определяются значения коэффициентов

$$\begin{aligned}
 \beta &= \frac{1 - F(k) - \frac{2G(k)}{k}}{4F(k)} = \frac{\bar{A}_2}{\bar{H}_2} = 0,409177753 \\
 a &= \frac{1 + \beta \frac{c_m^\alpha B^2 \omega_{изг}^2}{c_y^\alpha r^2 \omega_{кр}^2}}{1 + \beta \frac{c_m^\alpha B^2}{c_y^\alpha r^2}} = 0,81295314 \\
 \alpha_1 &= \frac{1 - a + \frac{\omega_{изг}^2}{\omega_{кр}^2} \left(1 - \frac{1}{a} \right)}{\left(1 - \frac{\omega_{изг}^2}{a \omega_{кр}^2} - c_y^\alpha \frac{\rho B^2 F(k)}{2m} \frac{1}{2\bar{A}_3} \right) \bar{A}_3} = 0,304121224
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

$$\beta_1 = \frac{1}{4} \left(1 - F(k) - \frac{2G(k)}{k} \right) = 0,242481181$$

$$\beta_2 = F(k) - \frac{kG(k)}{2} = 0,631341151$$

где

$$\bar{H}_1 = -F(k) = -0,592605976$$

$$\bar{A}_1 = F(k) = 0,592605976$$

$$\bar{H}_2 = -\frac{1}{4} \left[1 + F(k) + \frac{2G(k)}{k} \right] = -0,257518819$$

$$\bar{A}_2 = -\frac{1}{4} \left[1 - F(k) - \frac{2G(k)}{k} \right] = - - 0,242481181 \quad (4.7)$$

$$\bar{H}_3 = - \left[F(k) - \frac{kG(k)}{2} \right] = -0,631341151$$

$$\bar{A}_3 = F(k) - \frac{kG(k)}{2} = 0,631341151$$

Вычисляется критическая скорость дивергенции

$$U_{\text{див}} = 2\pi f_k \sqrt{\frac{2m_\alpha r^2}{\rho B^2 c_{m0}^\alpha}} = 90,24506604 \text{ м/с} \quad (4.8)$$

где f_k – собственная частота крутильных колебания ПС, Гц; m_α – эквивалентная погонная масса ПС, кг/м; r – радиус инерции сечения, м; c_{m0}^α – производная коэффициента продольного аэродинамического момента mZ по углу закручивания α ПС в воздушном потоке при $\alpha = 0$, устанавливаемая только в результате физических исследований в аэродинамических трубах.

Критическая скорость флаттера выражается через критическую скорость дивергенции по формуле

$$U_{\text{фл}} = U_{\text{див}} \sqrt{\alpha} = 49,76761536 \text{ м/с} \quad (4.9)$$

где α определяется формулой (4.6).

Круговая частота флаттера выражается через круговую частоту собственных крутильных колебаний по формуле

$$\omega_{\text{фл}}^2 = \omega_{\text{кр}}^2 a = 9,015240058 \text{ рад/с} \quad (4.10)$$

где a определяется формулой (4.6).

Критическая скорость срывного флаттера при отсутствии затухания, т.е. критическая скорость с запасом вычисляется по формуле

$$U_{\text{ср.фл}} = \omega_{\text{кр}} \sqrt{\frac{16m^2 r^4}{\beta_2 \rho B^2 c_m^\infty (8mr^2 + \beta_1^2 \rho B^4 c_m^\infty)}} = 112,7576181 \text{ м/с.} \quad (4.11)$$

По полученным значениям уточняется значение приведенной частоты флаттера \bar{S} (формулы (4.12) и (4.13))

- для изгибно-крутильного флаттера

$$\bar{S} = \frac{\omega_{\text{фл}} B}{U_{\text{фл}}} = 1,628941846 \quad (4.12)$$

- для срывного флаттера

$$\bar{S} = \frac{\omega_{\text{кр}} B}{U_{\text{ср.фл}}} = 0,797395185, \quad (4.13)$$

а также связанные с ней аэродинамические функции Теодорсена $F(k)$ и $G(k)$ по Таблица 4.2.

Далее итерационный процесс продолжается до тех пор, пока отличие искомых значений не составит менее 10%. Значение критической скорости флаттера рекомендуется округлять до целых чисел в меньшую сторону.

В данном примере потребовалось три итерации, в результате получены следующие значения критических скоростей

$$\begin{aligned} U_{\text{див}} &= 93,89 \text{ м/с} \\ U_{\text{фл}} &= 50,95 \text{ м/с} \\ U_{\text{ср.фл}} &= 117,38 \text{ м/с} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Полученные значение критических скоростей значительно превышают критические скорости в соответствии с требованиями [91].

Для данной модели выполнена проверка аэродинамической устойчивости пролетного строения в аэродинамической трубе, явлений аэродинамической неустойчивости типа галопирование, флаттер, дивергенция в исследуемом диапазоне скоростей не выявлены, что подтверждает предварительный аналитический расчет.

4.2. ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СНЕГОПЕРЕНОСА

Экспериментальное моделирование процессов снеготранспорта и снеготранспортировки является одним из наиболее наукоемких видов теоретико-экспериментального моделирования климатических нагрузок.

В настоящее время проектируется большое количество критически важных объектов транспортной инфраструктуры со сложной формой кровельных покрытий, которая не соответствует примитивам, рассматриваемым в нормативных документах.

При этом экспериментальное моделирование, которое регламентировано нормами при проектировании таких объектов, прибегает к ряду существенных допущений, таких как:

- отсутствие учета явлений последовательного накопления снега;
- отсутствие учета процессов адгезии и когезии;
- отсутствие возможности моделирования сползания снега в период повышенных температур воздуха и др.

Именно поэтому данная методика в первую очередь нуждается в верификации инженерными методами. В настоящей главе мы рассмотрим верификацию методики на классическом примитиве (здание с плоской кровлей прямоугольное в плане), а также на реальном сооружении с висячим кровельным покрытием.

4.2.1. Верификация методики моделирования снеготранспорта на классическом примитиве (здание с плоской кровлей прямоугольное в плане)

На Рисунок 4.5 показана фотография модели куба с нанесенным слоем древесной муки. Размеры куба 500x500x500 мм. Загромождение рабочего сечения аэродинамической трубы не более 6%.



Рисунок 4.5– Модель куба с тонким слоем модельного порошка

Эксперимент выполнялся по следующей программе:

- Установлен куб под нулевым углом атаки. Грань куба под углом атаки 0 градусов.
- Нанесен тонкий слой модельного порошка. Толщина слоя 1,5 – 2 мм.
- Выполнена продувка на скорости 4 м/сек. в течение 90 секунд.
- Скорость потока повышена до 6м/сек. Выдержка на высокой скорости 10 секунд.
- Остановка продувки, фотофиксация результатов эксперимента.

Результат продувки показан на Рисунок 4.6.

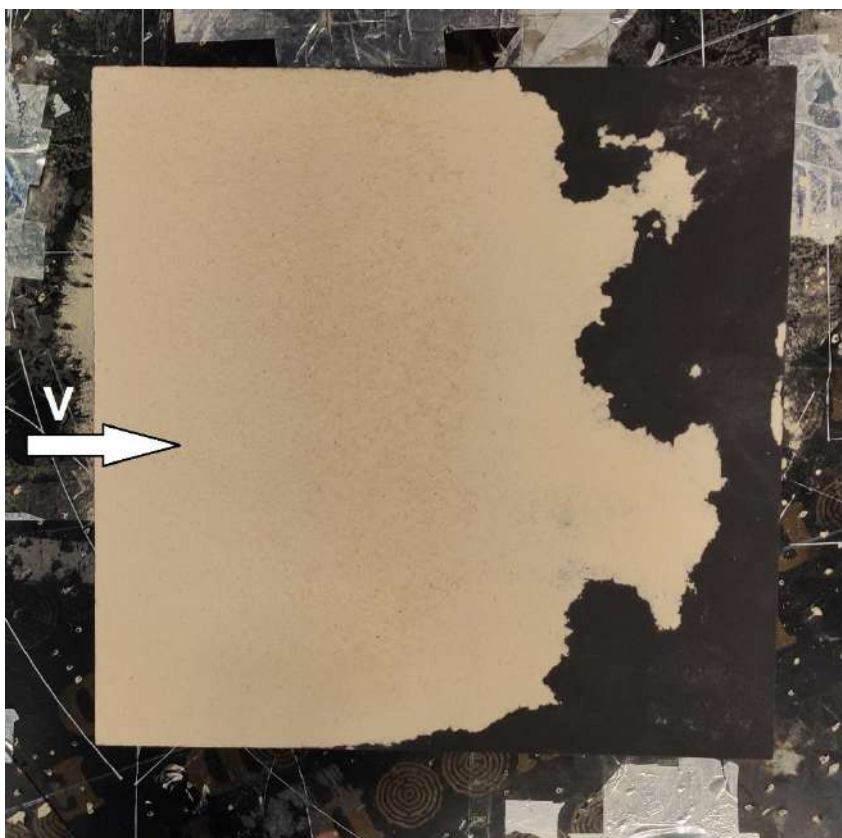


Рисунок 4.6– Результат продувки

Видны характерные зоны, свободные от древесной муки. На поверхности куба наблюдается зона с незначительным превышением слоя модельного порошка. При суммировании результатов круговой продувки получается равномерный слой, покрывающий плоскую кровлю куба.

В натуральных условиях в конце зимы на объектах с плоской кровлей наблюдаются значительные «шапки» снега. На Рисунок 4.7 показано фото снеговых отложений на плоской кровле (плоская кровля с углом наклона).



Рисунок 4.7– Фотография накопления снега на плоской кровле с уклоном. Заметны слои, образованные длительными снегопадами. В результате значительных снегоотложений сильно изменен геометрический профиль кровли, что привело к изменению структуры ветровых потоков над кровлей.

Для моделирования условий значительного слоя снега на кровле проведен эксперимент, когда модельный порошок нанесен слоем 1 см.

На Рисунок 4.8 показано фото с «толстым» слоем древесной муки на модели. Видно, что по краю кровли мука частично ссыпается и формируется аэродинамически гладкая кромка. Структура потока существенно меняется. Вихревая структура вдоль передней кромки становится менее выраженной. Кроме того, частицы древесной муки подхватываются потоком при большей скорости. Это вызвано тем, что частицы древесной муки имеют структуру, похожую на снежинки. Отрыв частицы от нижележащего слоя затруднен и поэтому начальная скорость потока устанавливается более 7 м/сек.

Эксперимент выполнялся по следующей программе:

- Установлен куб под нулевым углом атаки. Грань куба под углом атаки 0 градусов.

- Нанесен «толстый» слой древесной муки. Толщина слоя 10 мм.
- Выполнена продувка на скорости 8 м/сек. в течение 300 секунд.
- Скорость потока повышена до 10м/сек. Выдержка на высокой скорости 5 секунд.
- Остановка продувки, фотофиксация результатов эксперимента.

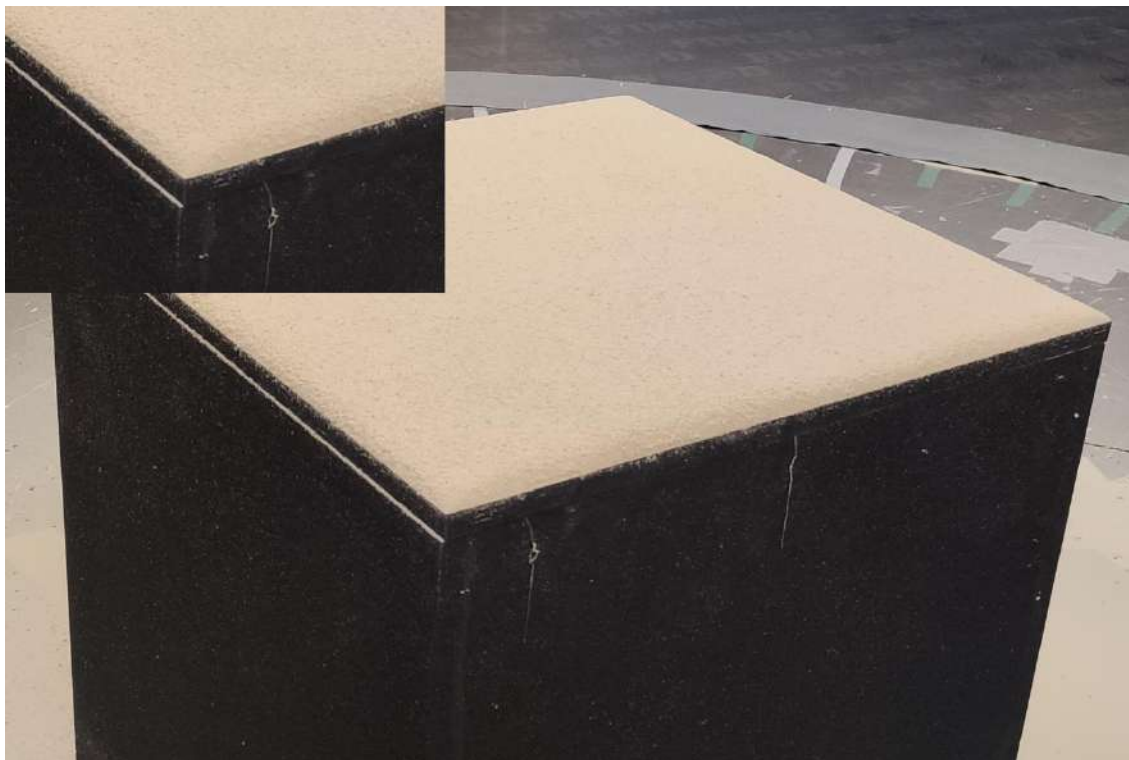


Рисунок 4.8– Модель с «толстым» слоем модельного порошка перед экспериментом

Результат продувки показан на Рисунок 4.9. Картина распределения модельного порошка идентична случаю, полученному для «тонкого» слоя. Толстый слой позволяет обнаружить крупномасштабные локуны на поверхности перенесенного ветровым потоком порошка.

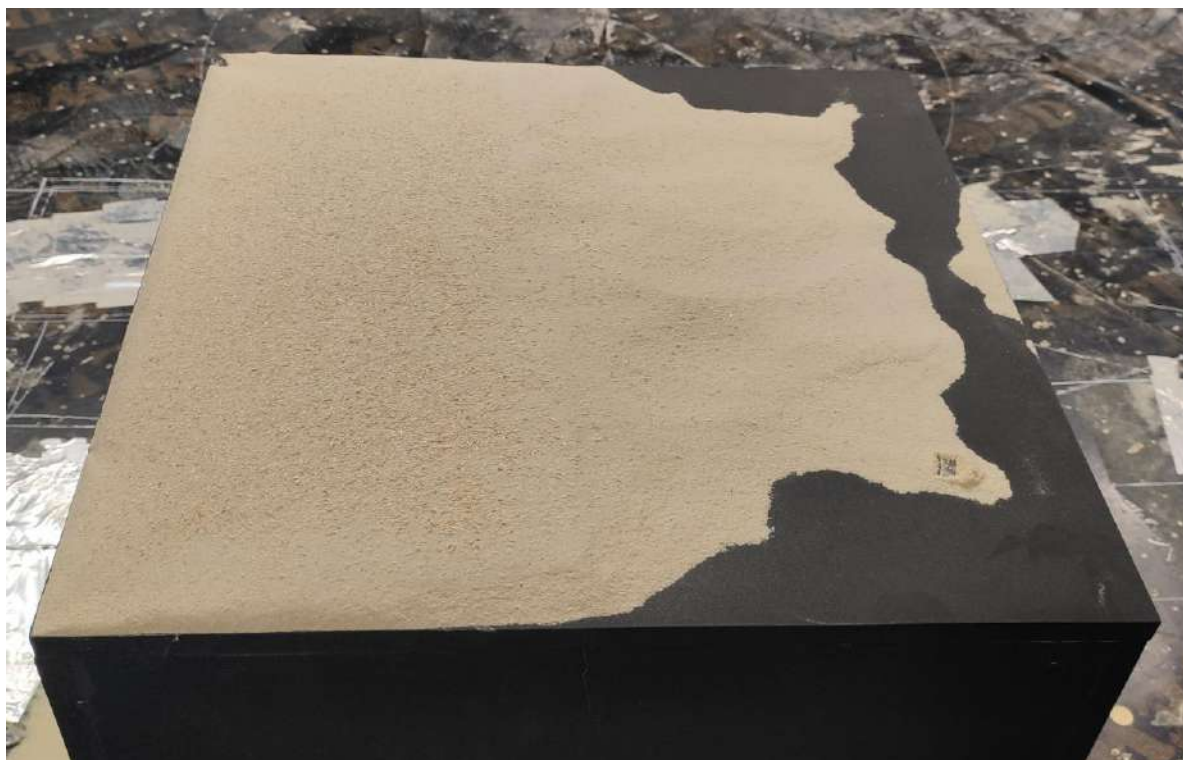


Рисунок 4.9– Результат продувки «толстого» слоя модельного порошка

Позади передней кромки формируется зона повышенного снеготранспорта, наблюдаемая как в натуральных условиях, так и в численном эксперименте. При суммировании результатов круговой продувки получается ровный слой снегоотложений.

На Рисунок 4.7 показана кровля с небольшим козырьком над стеной. Данный аэродинамический профиль формирует иную картину течения, чем ранее рассмотренный вариант. Для моделирования карниза над стенками куба изготовлена модель с равномерным карнизом шириной 100мм над всеми сторонами. Эксперимент выполнен по программе, представленной выше. На Рисунок 4.10 показана модель с тонким слоем модельного порошка на увеличенной крышке куба.

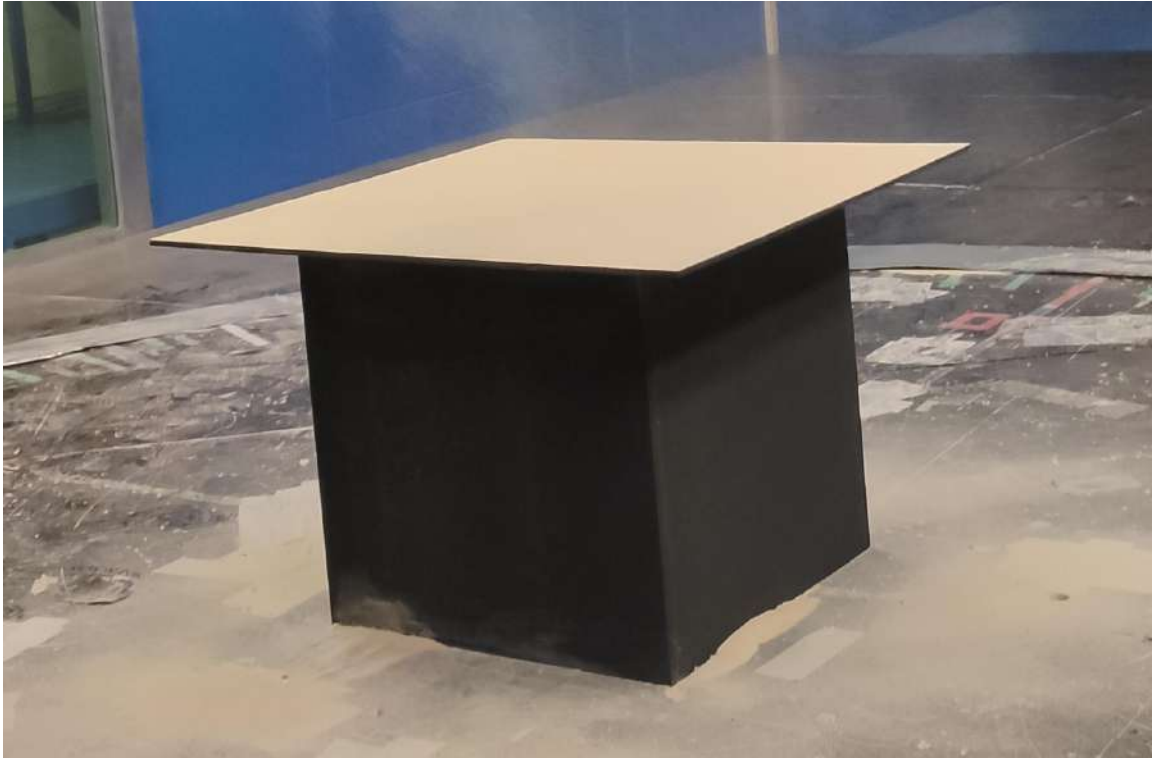


Рисунок 4.10– Модель с карнизом покрыта тонким слоем древесной муки перед проведением эксперимента

Основная экспозиция модели выполнена при скорости потока 4м/сек. Результат продувки показан на Рисунок 4.11. Распределение модельного порошка соответствует известным представлениям о структуре ветрового потока над подобной конструкцией. Суммирование результатов круговой продувки дает результат μ менее единицы.



Рисунок 4.11– Результат продувки модели с карнизом (тонкий слой)

В конце зимы на кровле собирается значительный слой снега, что приводит к изменению аэродинамического контура модели. Для получения картин снегораспределения выполнен эксперимент с «толстым» слоем модельного порошка. На Рисунок 4.12 показана фотография результата экспозиции толстого слоя древесной муки на модели с карнизом в ветровом потоке при скорости 8м/сек.



Рисунок 4.12– Результат продувки модели с карнизом (толстый слой)

На Рисунок 4.12 отчетливо видно, что скругленная толстая передняя кромка влияет на структуру течения над моделью. Для проверки гипотезы, что толстый слой модельного порошка меняет аэродинамический профиль модели, изготовлена модель с сформированной толстой передней кромкой. Толстая передняя кромка сделана прикреплении к нижней кромке карниза обтекателя. Модель с конструктивной толстой передней кромкой показана на Рисунок 4.13.

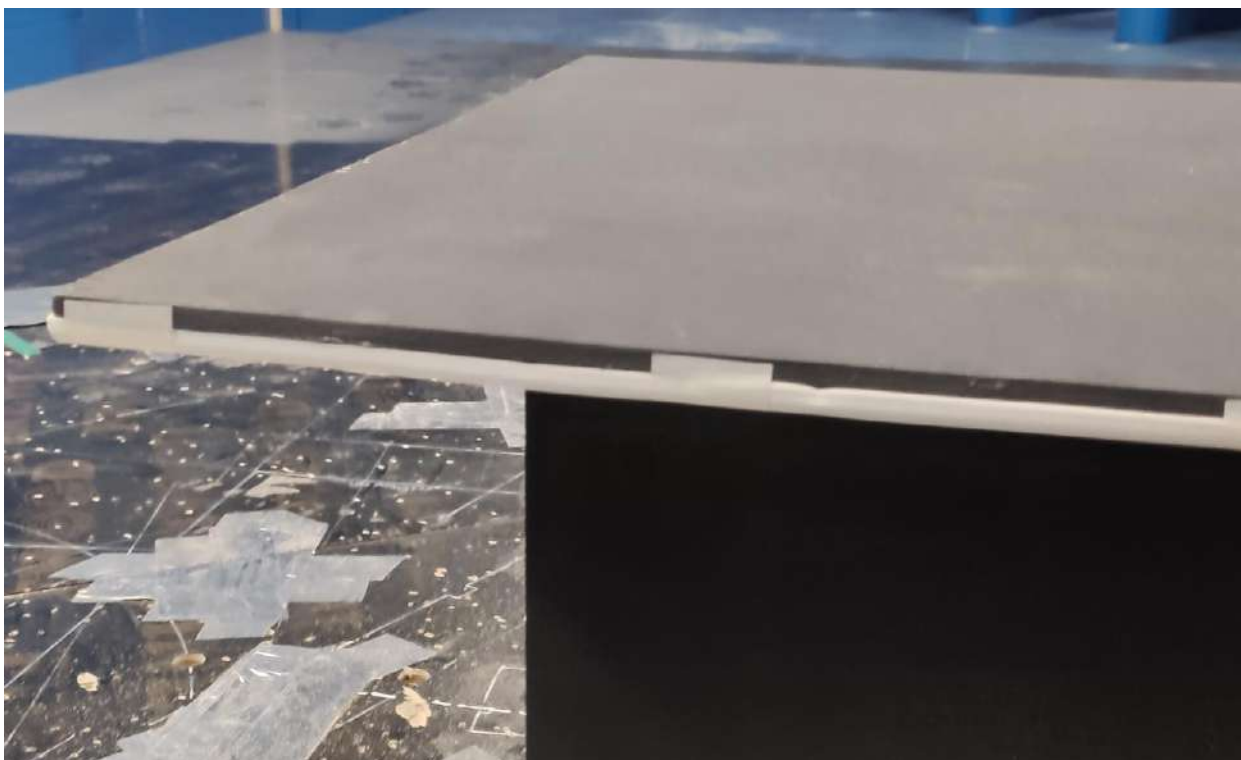


Рисунок 4.13– Модель с конструктивной аэродинамически толстой кромкой перед экспериментом. Тонкий слой модельного порошка

В результате экспозиции модель в потоке со скоростью 4м/сек наблюдается смещение модельного порошка, идентичное случаю «толстого» слоя на карнизе с острой кромкой.

На Рисунок 4.14 показана фотография с распределением модельного порошка после экспозиции в ветровом потоке на плоской кровле с карнизом и конструктивной толстой передней кромкой над кубом. Сравнение результатов, представленных на Рисунок 4.12 и Рисунок 4.14 показывает, что структура потока над моделями идентична. Распределение древесной муки, вызванное ветровым потоком, подтверждает, что формирование толстой передней кромки можно организовать как конструктивным элементом, так и подсыпкой модельного порошка.



Рисунок 4.14— Модель с карнизом и конструктивной толстой передней кромкой после экспозиции в потоке

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. Аналогично к концу зимы снег укрывает все неоднородности на поверхности кровли, и вновь образованная поверхность становится более обтекаемой, а дальнейший перенос снега становится затрудненным, и окончательная толщина снежного покрова нарастает равномерно.

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.

4.2.2. Верификация методики моделирования снегопереноса на реальном сооружении с висячим кровельным покрытием

В качестве исследуемого объекта выбрано сооружение с висячим покрытием (Рисунок 4.15).

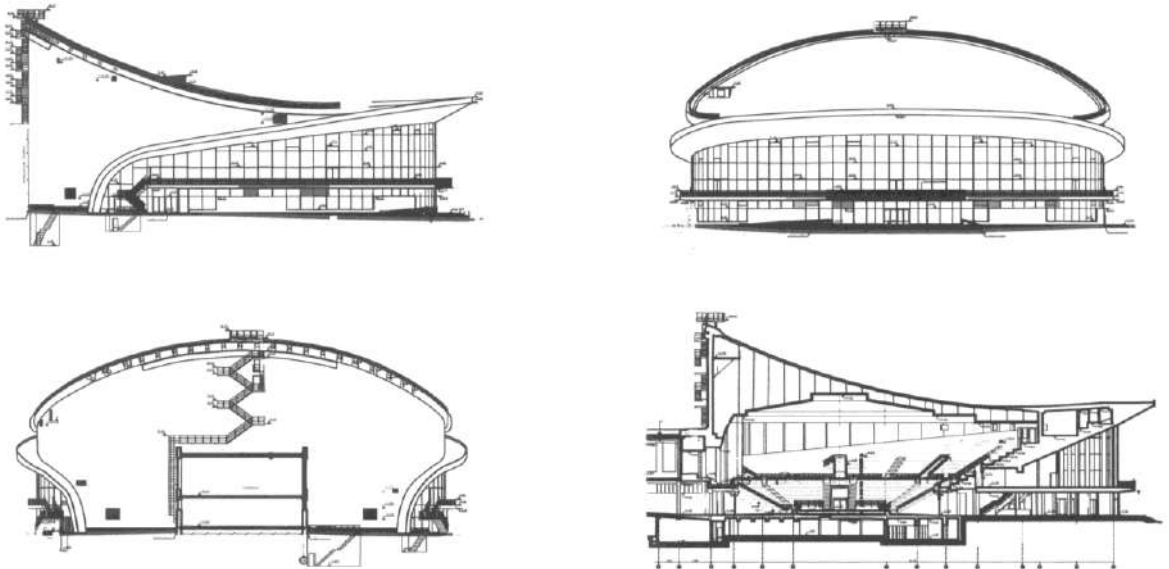


Рисунок 4.15– Исследуемый объект

Элементы конструкции, расположенные на кровле исследуемого объекта, а также форма кровельного покрытия, соответствуют схемам, приведенным в Приложении Б к СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*».

Наиболее близкой к рассматриваемому варианту висячего покрытия формой в продольном направлении согласно СП 20.13330 является схема Б.10 [90]. Нормативный вид данной схемы показан на рисунке 2.

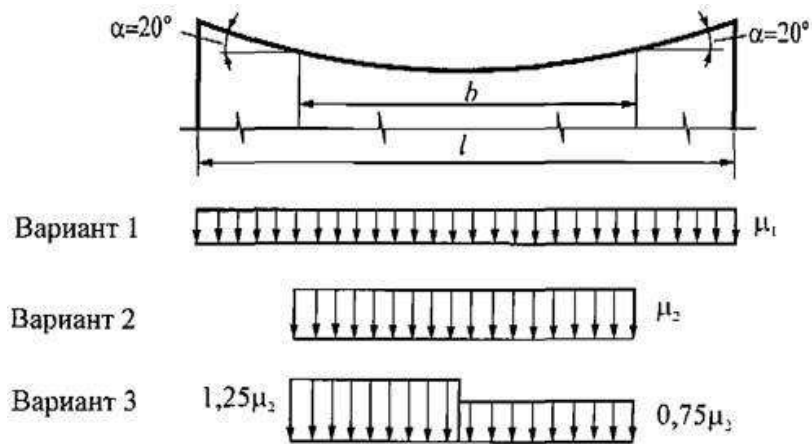


Рисунок 4.16– Схемы распределения снеговой нагрузки на висячие покрытия цилиндрической формы

Указанная схема учитывает равномерное загрузение покрытия по всей площади горизонтальной проекции, а также неравномерные загрузения, учитывающие возможное скопление снега в нижней (провисающей) части покрытия и частичный перенос снега при устойчивом направлении ветра.

На основании комплексного инженерного анализа результатов экспериментальных исследований по методике, приведенной в Главе 2, а также вышеуказанного нормативного подхода получены различные варианты распределения снеговой нагрузки по кровле объекта. Самым неблагоприятным вариантом нагружения, который необходимо учесть при проектировании, является схема, приведенная на Рисунок 4.17 и Рисунок 4.18. На схемах, приведенных на Рисунок 4.17 и Рисунок 4.18, наблюдается повышенное значение снеговой нагрузки на одной половине покрытия в результате переноса при устойчивом направлении ветра.

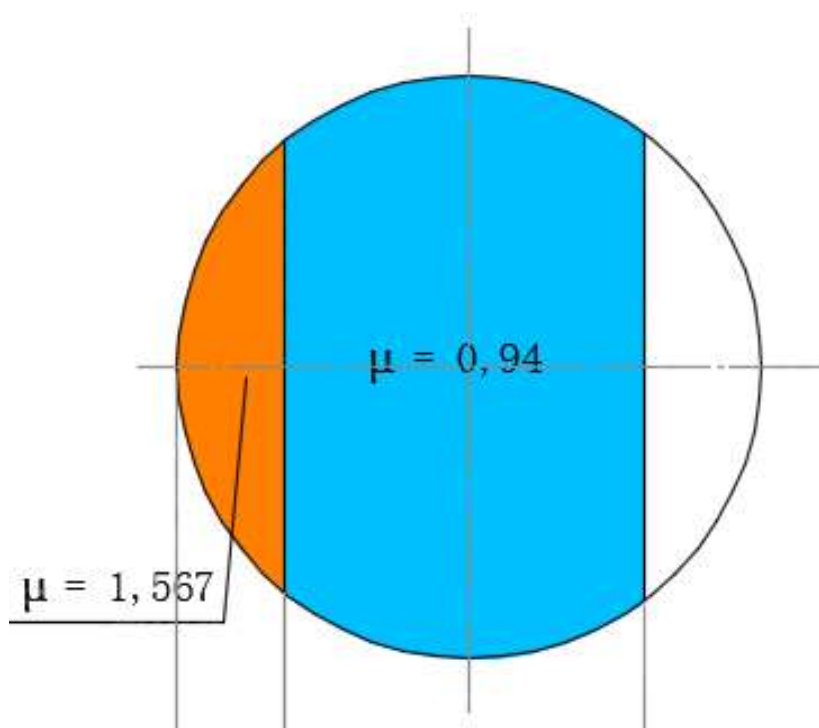


Рисунок 4.17– Неравномерное распределение снеговой нагрузки. Вариант 1

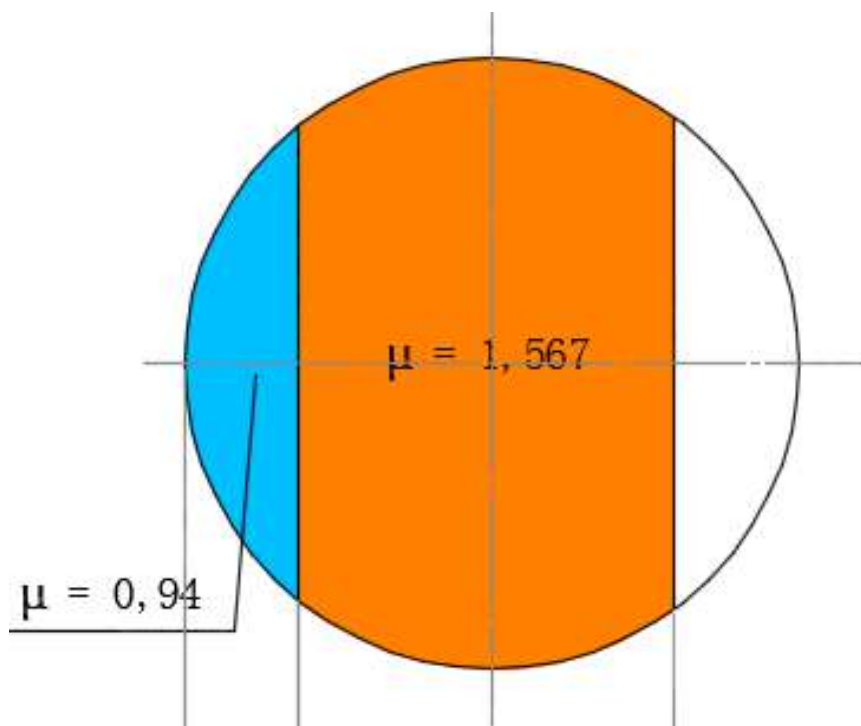


Рисунок 4.18– Неравномерное распределение снеговой нагрузки. Вариант 2

Для дополнительной верификации выполнено сравнение с результатами натуральных наблюдений за процессами снеготранспорта и снеготложений на аналогичном покрытии.

Для сопоставления полученных данных была проведена фотофиксация (Рисунок 4.19) и натурные измерения толщины снежного покрытия на данной кровле в зимний период.



Рисунок 4.19– Фотофиксация снегопереноса на натурном объекте



Рисунок 4.20– Измерение толщины снегового покрова

Измерения проводились в течение зимнего периода.

Были проведены замеры толщины снега в различных точках, расположенных согласно схеме на Рисунок 4.21.

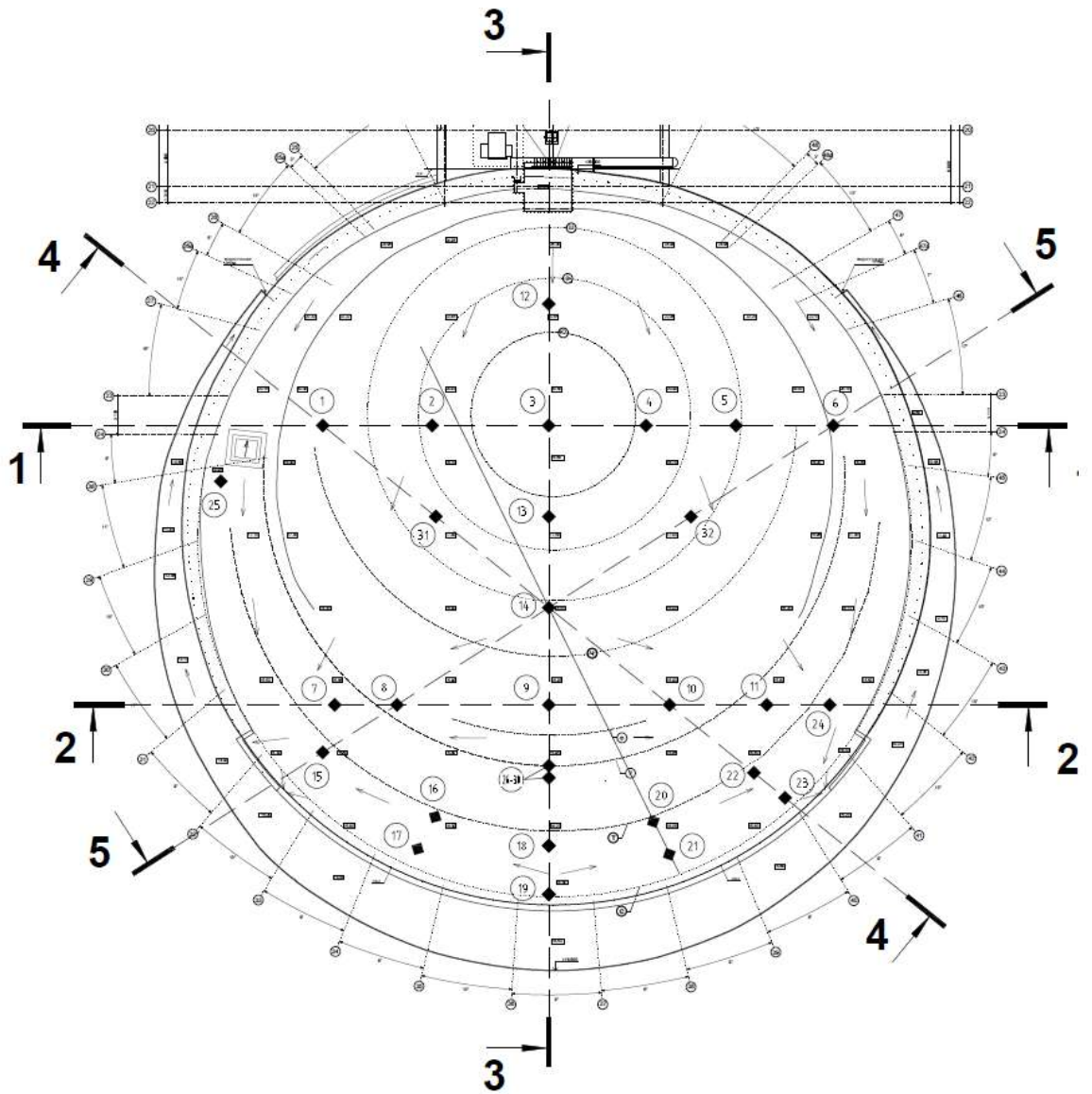


Рисунок 4.21– Расположение точек натуральных замеров

Результаты сезонного мониторинга приведены на графиках Рисунок 4.22-
Рисунок 4.26.

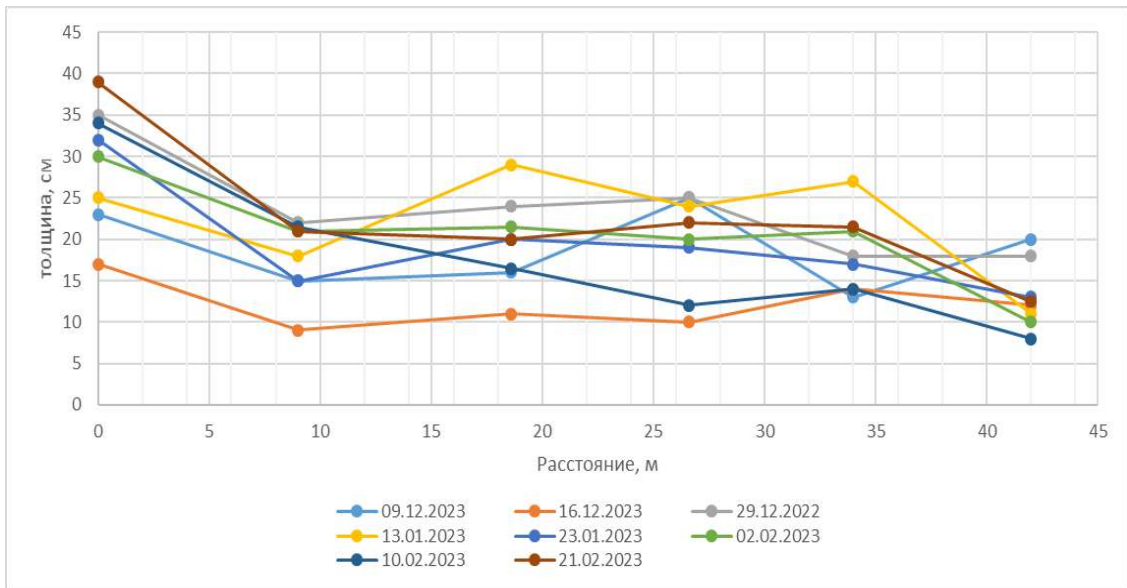


Рисунок 4.22– Разрез 1-1

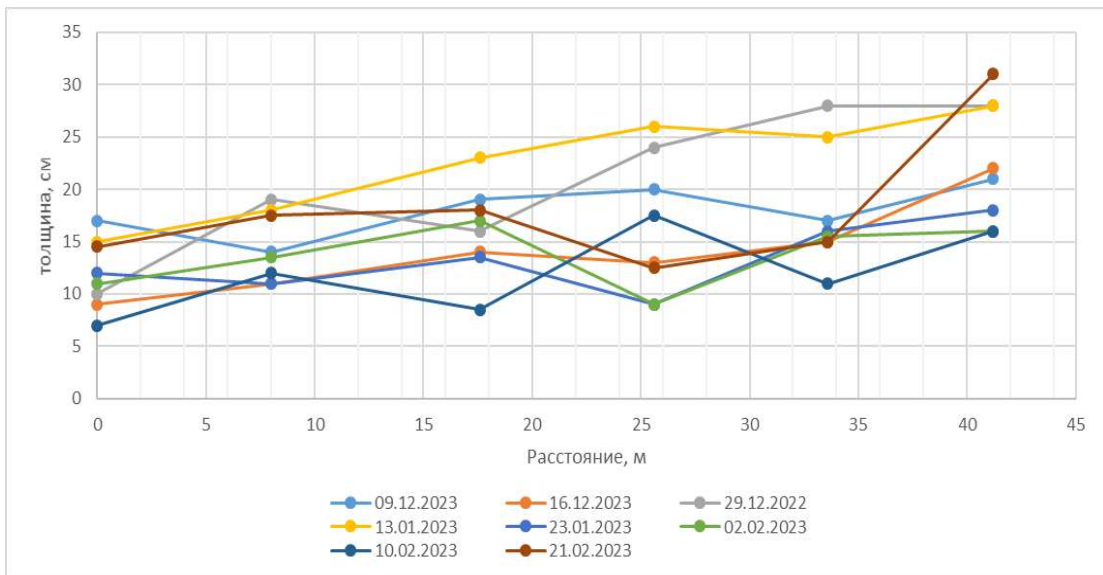


Рисунок 4.23– Разрез 2-2

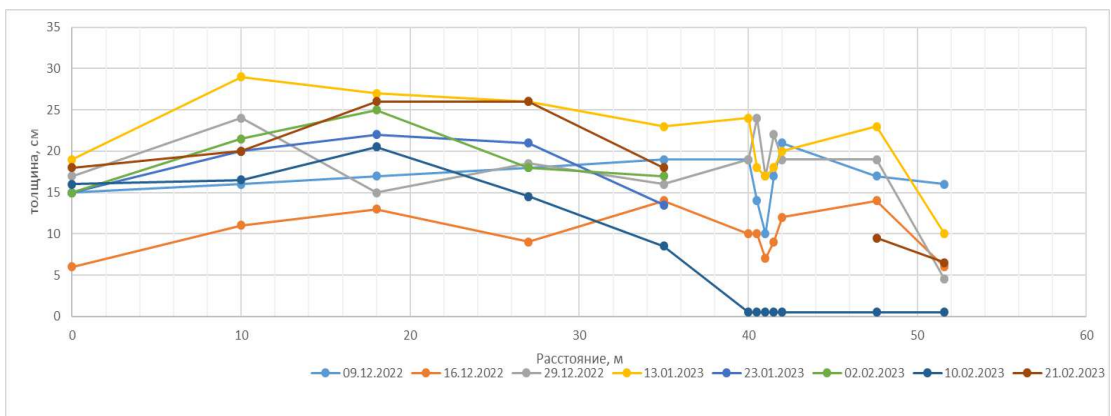


Рисунок 4.24– Разрез 3-3

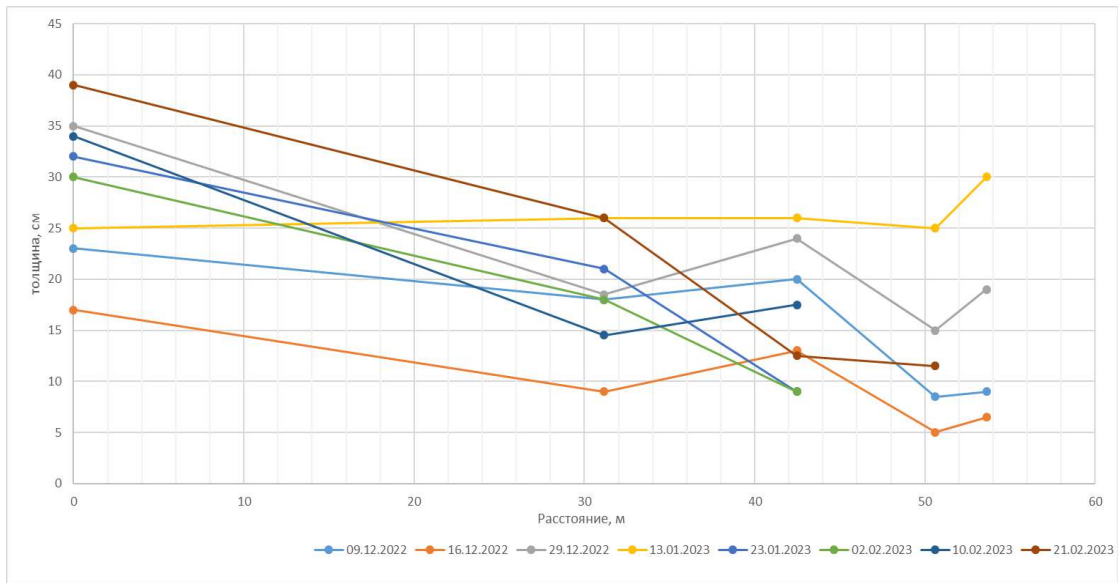


Рисунок 4.25– Разрез 4-4

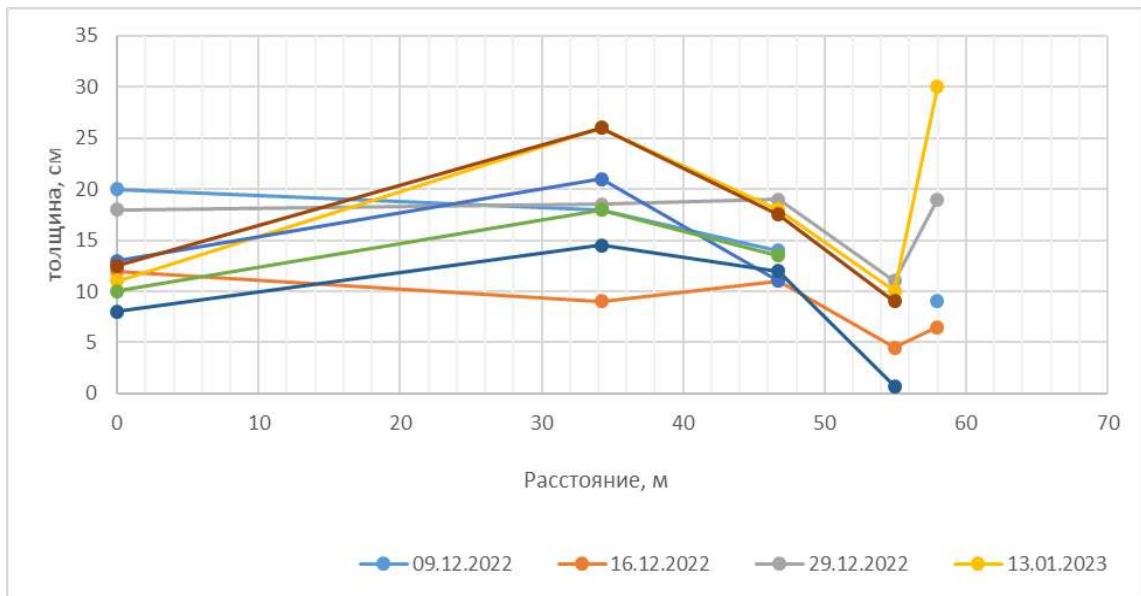


Рисунок 4.26– Разрез 5-5

Результаты натурных измерений указывают на существенную неравномерность распределения снегового покрова на исследуемом покрытии. Общий характер снеговых отложений соответствует схемам, полученным в результате инженерного анализа результатов эксперимента, наблюдаются зоны с уносом снегового покрова на подветренной части покрытия и достаточно равномерное распределение снегового покрова на центральной его части. В целом, полученный результат указывает, что при разработке проектных решений для отдельных типов висячих кровельных покрытий допустимо использовать

результаты специализированных экспериментальных исследований, выполненных в соответствии с методикой, приведенной в Главе 2.

4.3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 4

В главе предложен и апробирован на нескольких разнотиповых (по классификации из первого раздела) критически важных объектов транспортной инфраструктуры инженерный метод верификации результатов теоретико-экспериментального моделирования. Применение метода верификации совместно с современными информационно-вычислительными комплексами и экспериментальными исследованиями физических моделей, позволяет решить многие задачи техносферных воздействий методами экспериментального моделирования, которые не уступают по достоверности аналогичным результатам натурных исследований.

Реализация предлагаемых подходов на этапе проектирования на 40% увеличивает эксплуатационный этап жизненного цикла объектов транспортной инфраструктуры.

Хотя рассмотренная методика не затрагивает влияния тепловых потоков на таяние снега и унос некоторой массы атмосферных осадков, в целом она описывает интерференцию между строительными объектами и ее влияние на перераспределение снеговой нагрузки, что и подтверждает расчетное и экспериментальное моделирование.

На основании комплексного инженерного анализа результатов экспериментальных исследований по методике, приведенной в Главе 2, а также нормативного подхода получены различные варианты распределения снеговой нагрузки по кровле объекта, уточняющие неблагоприятные варианты нагружения.

В целом, полученный результат указывает, что при разработке проектных решений для отдельных типов критически важных объектов транспортной инфраструктуры допустимо использовать результаты специализированных

экспериментальных исследований, выполненных в соответствии с методикой, приведенной в Главе 2.

5. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ, И САМИ СООРУЖЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СЛУЖБЫ

5.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЫЛЕВЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ

Существующие в настоящее время аналитические модели распространения загрязнений неприменимы при прогнозировании развития ситуации на плотно застроенных территориях, поскольку не учитывают аэродинамических эффектов, возникающих при обтекании зданий и сооружений.

В тоже время современные измерительные системы и испытательные стенды позволяют решать данные задачи, при условии наличия специализированных методик.

Особенностью экспериментального исследования распространения пылевых загрязнений на территории объектов транспортной отрасли является достаточность, в большинстве задач, достижения качественного, а не количественного результата. Это обусловлено собственно постановкой задачи, как правило, это прогнозирование направления распространения загрязнений при том или ином направлении ветрового потока (определяется в соответствии с розой ветров для площадки застройки), а также проверка эффективности выбранной конструкции пылезащитного экрана. При этом достижение количественного результата – скорость распространения газопылевого облака, а также концентрация загрязняющих веществ на различном удалении от источника загрязнения также возможно. Использование современных бесконтактных лазерных систем позволяет фиксировать мгновенные поля скоростей высокотурбулизированных воздушных потоков, распространяющихся на территории застройки, без вмешательства в

среду, а совместное применение датчиков концентрации загрязняющих веществ дает комплексную информацию о концентрации загрязняющих веществ.

Собственно методика таких исследований включает в себя следующие этапы:

- в рабочей зоне аэродинамической трубы размещается модель исследуемого участка застройки (транспортного узла), расположенного в непосредственной близости от источника загрязнения;
- производится запуск вентиляторной установки, в рабочей зоне устанавливается скорость ветрового потока, соответствующая условиям автомодельности по числу Рейнольдса;
- выполняется засев потока веществом соответствующим условиям проведения эксперимента. При необходимости качественной оценки распространения загрязнения возможна простая дымовая визуализация, в таком случае используется глицерин, который смешивают с дистиллированной водой и небольшим количеством спирта. При необходимости использования бесконтактных лазерных систем используется специальная жидкость (синтетическое масло), которая имеет химическую формулу $C_{26}H_{50}O_4$. При необходимости использования датчиков концентрации используется глицерин с примесями, соответствующими характеристикам модели используемого датчика.
- производится фото- и видеофиксация картины распределения воздушных потоков на территории исследуемого объекта.
- выполняется поворот модели в рабочей зоне аэродинамической трубы с шагом, соответствующим программе испытаний.
- на основании анализа круговой продувки, а также на основании климатического анализа территории застройки разрабатываются предложения по установке защитных экранов.
- модель защитного экрана монтируется на модель исследуемого объекта и выполняется повторный цикл исследований для подтверждения эффективности выбранного решения.

Апробация данной методики выполнена на транспортном узле угольного терминала (Рисунок 5.1). Основной задачей исследования является разработка проектного решения по размещению пылезащитных экранов для предотвращения распространения угольной пыли.

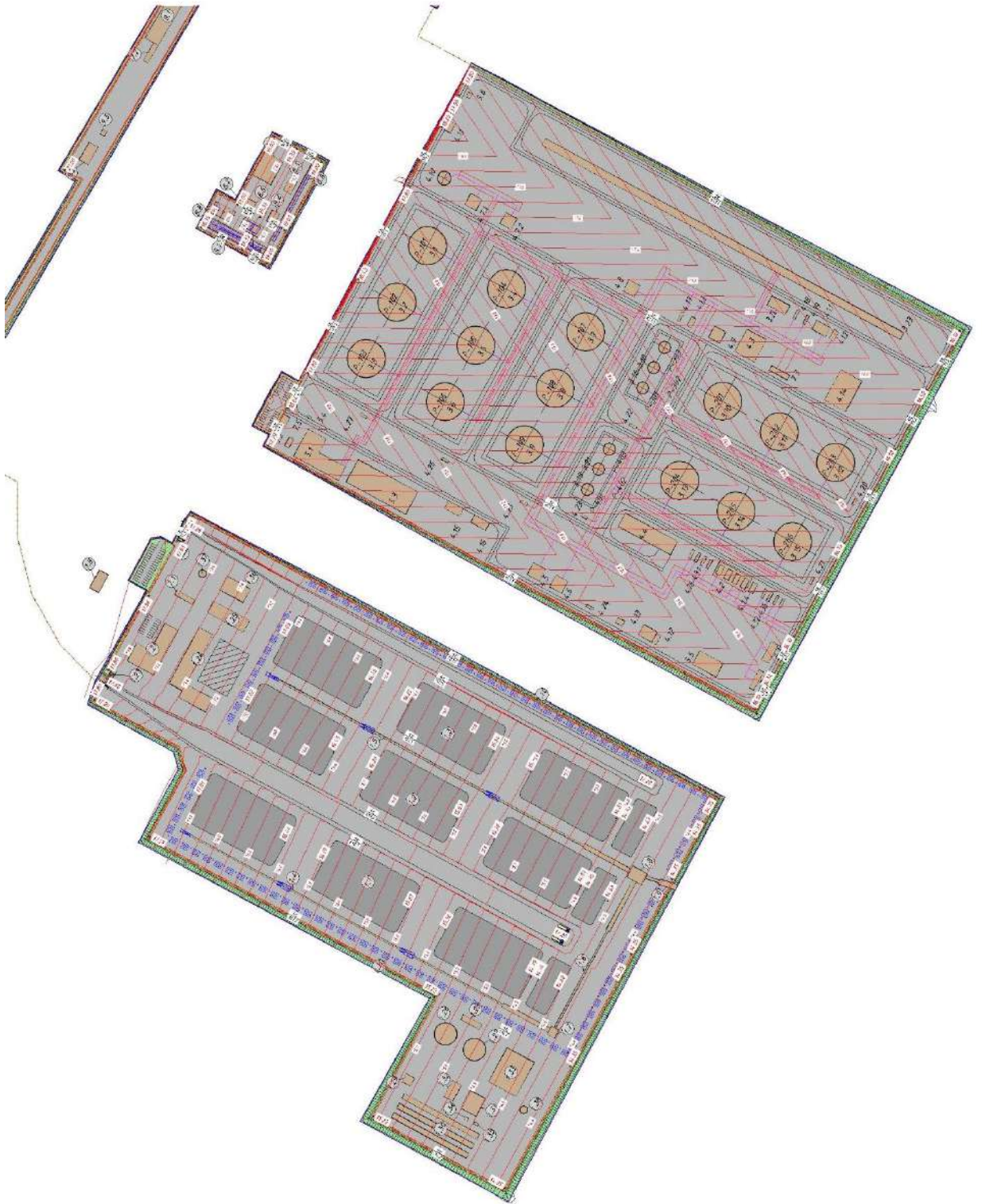


Рисунок 5.1– Ситуационный план угольного терминала

На основании результатов климатического анализа для рассматриваемого портового сооружения выбраны наиболее повторяющиеся направления ветрового потока.

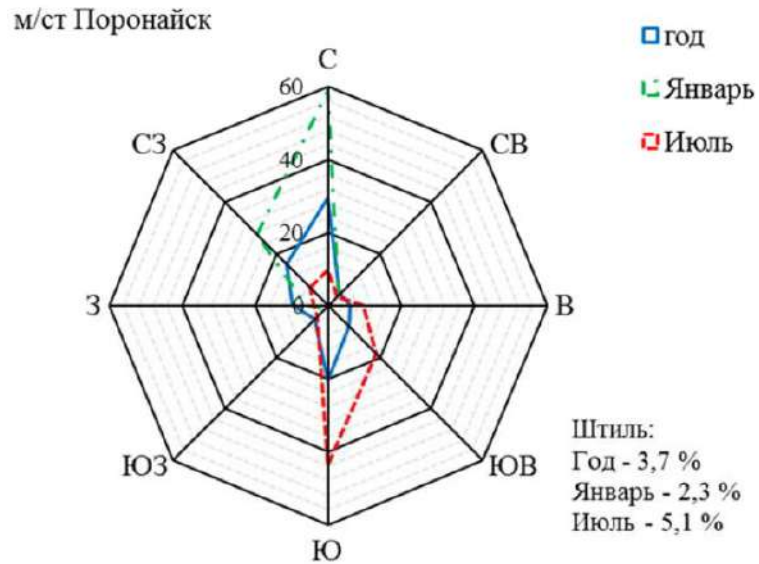


Рисунок 5.2– Роза ветров

Исследовались различные формы пылезащитных экранов (Рисунок 5.3).





Рисунок 5.3– Исследуемые конструкции пылезащитных экранов

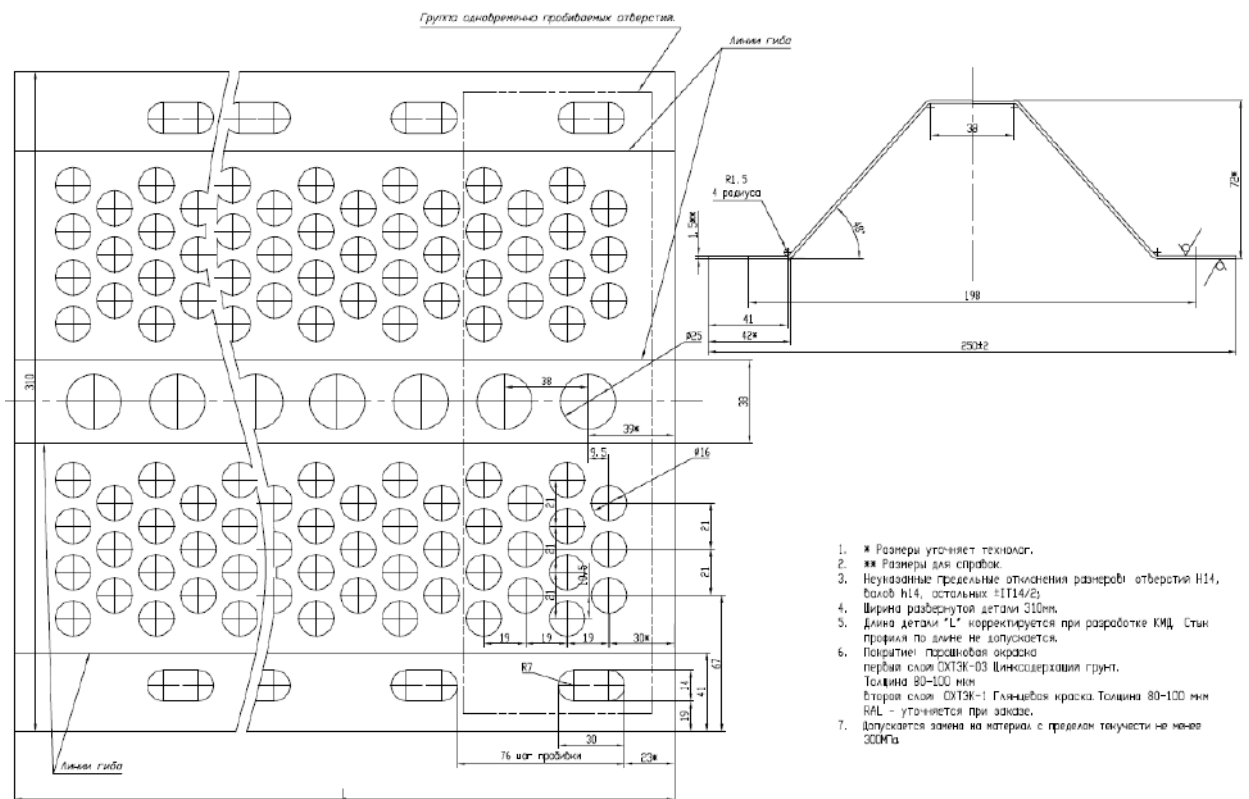


Рисунок 5.4– Выбранная конструкция пылезащитного экрана

На основании результатов экспериментальных исследований, а также данных гидрометеорологических наблюдений выбран оптимальный вариант размещения пылезащитных экранов (Рисунок 5.4).



Рисунок 5.5– План размещения пылезащитных экранов

5.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ ЛАНДШАФТНОГО ТИПА

5.2.1. Исследование различных типов шумозащитных экранов в аэродинамической трубе ландшафтного типа

В транспортном строительстве к основным формам поперечного сечения несущих конструкций шумозащитных экранов относят три основных вида (Рисунок 5.6): прямая стойка (а), прямая стойка с козырьком (б), криволинейная стойка (в). Между несущими элементами располагаются звукопоглощающие и

звукоотражающие панели, которые воспринимают основную часть ветровой нагрузки.

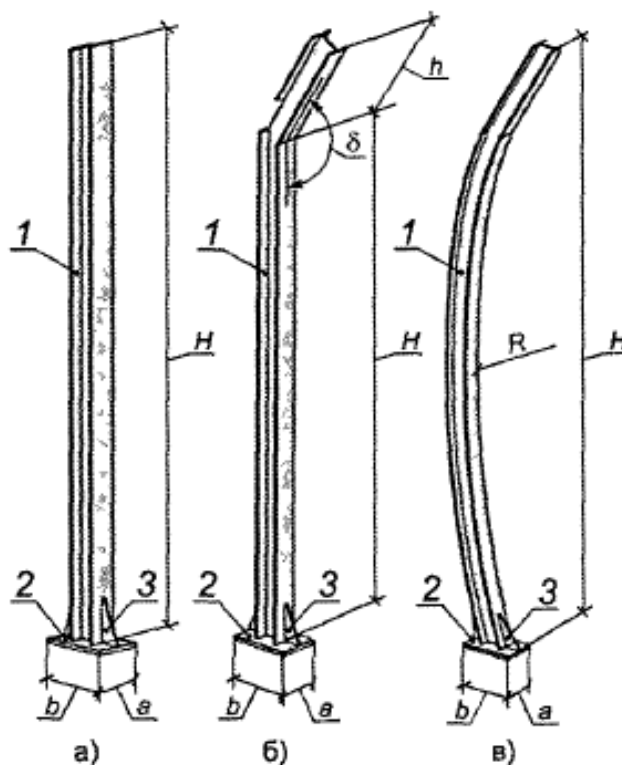


Рисунок 5.6– Формы поперечных сечений ШЭ

Одним из важных требований при проектировании шумозащитных экранов является обеспечение безопасности конструкции в результате действия ветровой нагрузки, что регламентирует СП 338.1325800.2018 “Защита от шума для высокоскоростных железнодорожных линий” [92]. Согласно пункту 8.6 необходимо учитывать расчётную ветровую нагрузку и пиковую, которая определяется по СП 20.13330.2016 “Нагрузки и воздействия” [90].

Схемы распределения среднего давления, приведённые в приложении В к СП 20.13330.2016 “Нагрузки и воздействия” [90] (как и в других нормах, например, Еврокод), рассматривают ограниченный набор наиболее распространённых форм сооружений.

Для экспериментальных исследований были разработаны и изготовлены две модели, а именно: модель экрана с сечением типа (а) и типа (б), высота каждого из экранов составляет 4 метра в натуре.

С учётом рабочей части аэродинамической трубы был выбран максимально возможный масштаб моделей, что позволило обеспечить условие по коэффициенту блокировки ($S_c < 10\%$). Исследуемые модели устанавливаются в рабочую зону АДТ. Итоговые модели показаны на рисунке ниже.



Рисунок 5.7 – Макеты исследуемых объектов

Экспериментальные исследования проводились на базе уникальной научной установки – Большая градиентная аэродинамическая труба НИУ МГСУ.

Характерные скорости ветра, при которых определялось локальное давление, лежит в диапазоне от 10 до 13 м/с. При анализе результатов характер автомодельности наблюдался при скоростях близким к 13 м/с.

При обдуве моделей по направлениям в 0, 30, 60, 300 и 330 градусов было выявлено, что наибольшее среднее давление возникает при угле атаки в 0 градусов.

Распределение значений аэродинамического коэффициента давления в контрольных точках на поверхности плоского экрана приведено ниже (Рисунок 5.8).

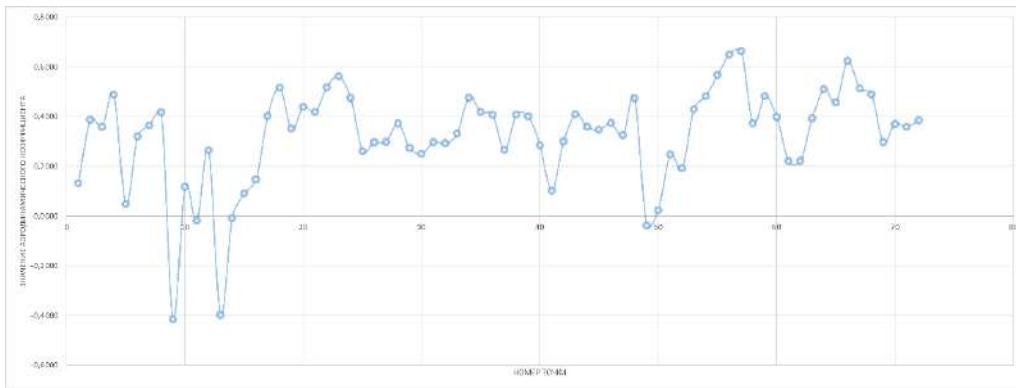


Рисунок 5.8– Распределение значений аэродинамического коэффициента давления в контрольных точках на поверхности плоского экрана

В ходе работы проведено физическое моделирование, в результате которого определены коэффициенты давления. Спроектирована и изготовлена модель исследуемого объекта.

5.2.2. Исследование влияния проницаемости шумозащитных экранов на аэродинамическую устойчивость пролетного строения

Балочное пролетное строение с двумя главными балками, длина максимального пролета 206,5 м, полная ширина пролетного строения – 31,35 м. Поперечное сечение пролетного строения приведено на Рисунок 5.9. В качестве начального значения логарифмического декремента затухания конструкции принято $\delta=0,02$.

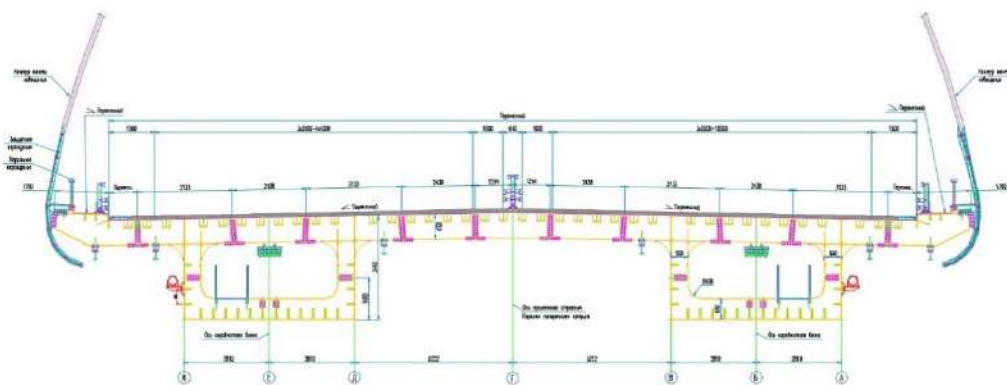


Рисунок 5.9– Схема поперечного сечения моста

Учитывая размеры сечения рабочей части аэродинамической трубы (4 x 2.5 м), был выбран оптимальный из условий загромождения потока масштаб моделей 1:70. В качестве материала для изготовления моделей выбран листовой алюминий, чтобы обеспечить высокую точность геометрического подобия, легкость и высокую жесткость. Мелкие детали выполнены из пластика и оргстекла.

Длина модели пролетного строения составляет 2100 мм, ширина – 441 мм.

С учетом возможности резки, сгибания, сварки и склеивания материалов, конструкция модели была реализована по следующей схеме (Рисунок 5.10 и Рисунок 5.11).

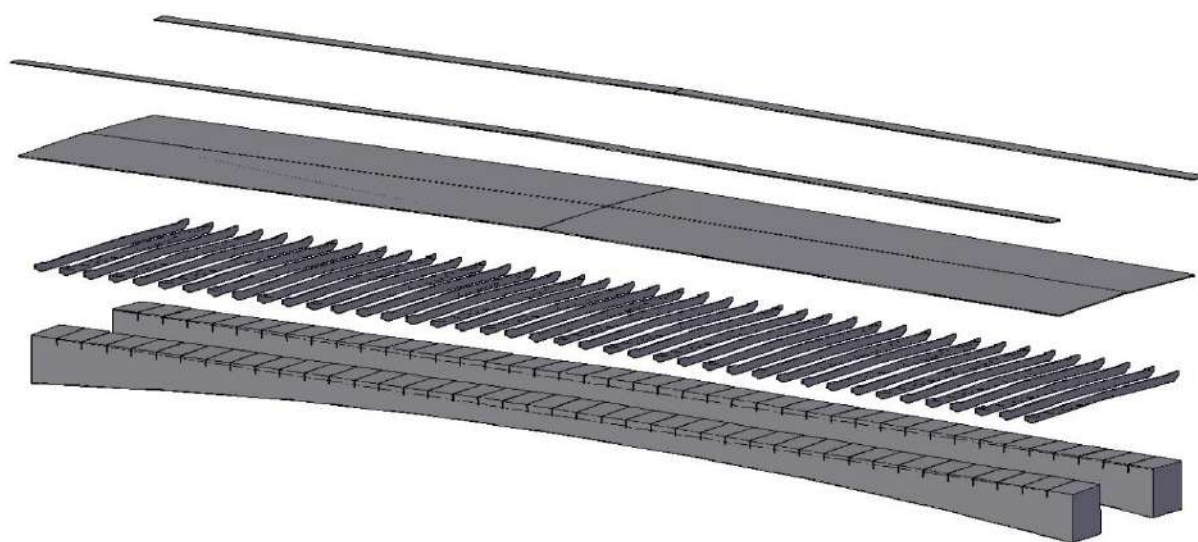


Рисунок 5.10– Схема сборки пролетного строения (шаг 1)

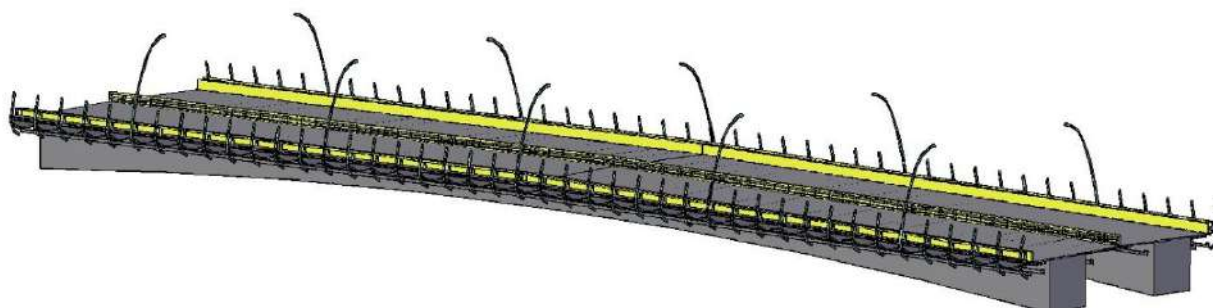


Рисунок 5.11– Схема сборки пролетного строения (шаг 2)

Изготовленные алюминиевые детали были доработаны до нужных размеров и склеены между собой двухкомпонентным эпоксидным клеем. Изготовленная модель представлена на Рисунок 5.12 – Рисунок 5.14.

Результаты измерения частот моделей пролетных строений на измерительном стенде приведены на Рисунок 5.15–Рисунок 5.17.



Рисунок 5.12– Модель пролетного строения моста (сплошной экран). Вид сверху



Рисунок 5.13– Модель пролетного строения моста (сплошной экран). Вид снизу



Рисунок 5.14 – Модель пролетного строения моста (проницаемый экран).
Вид сверху

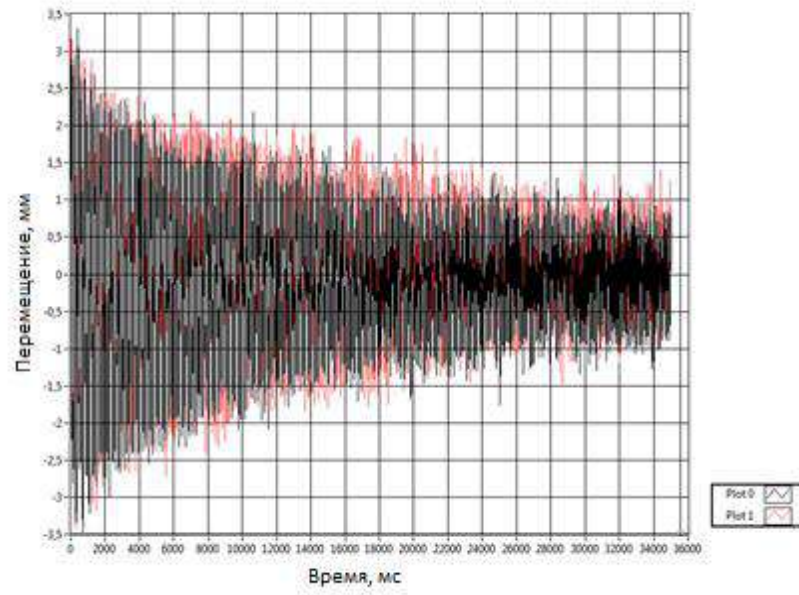


Рисунок 5.15 – Затухающий колебательный процесс

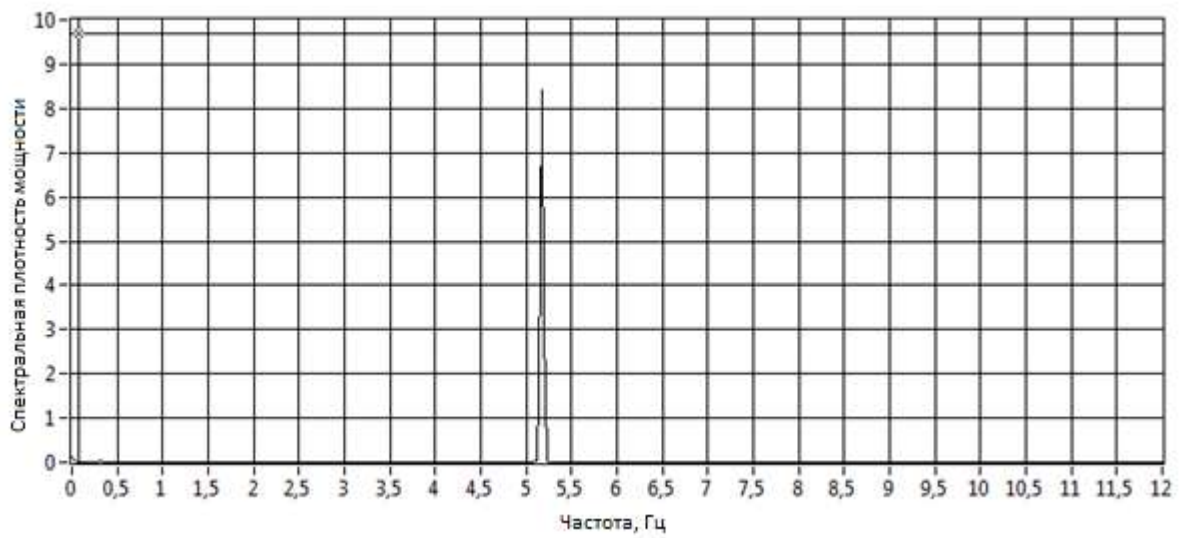


Рисунок 5.16– Спектральная плотность мощности для изгибных колебаний

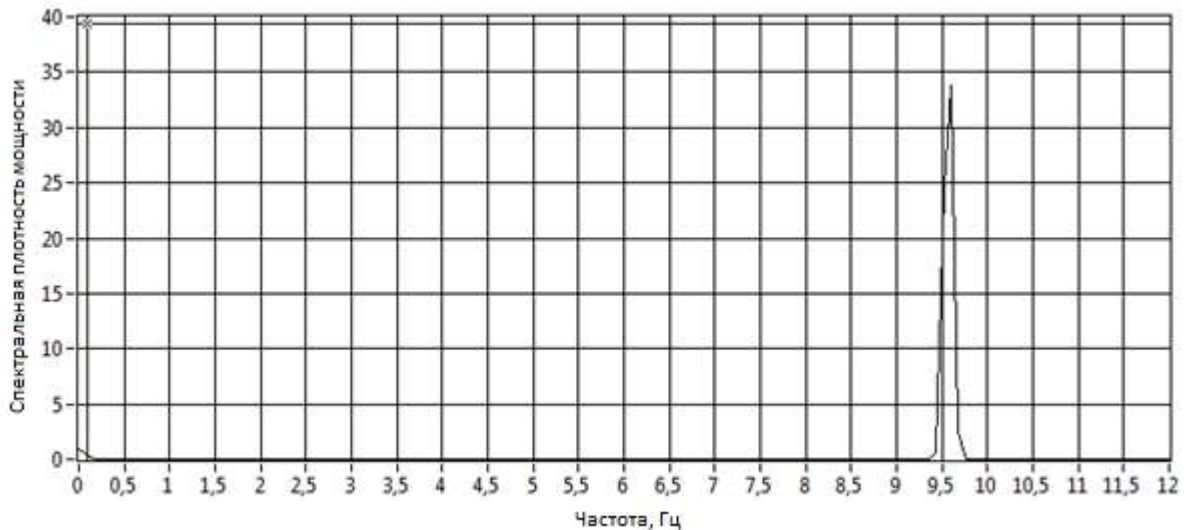


Рисунок 5.17 – Спектральная плотность мощности для крутильных колебаний

При проведении динамических испытаний модель закрепляется на пружинных подвесах в специализированном стенде, при угле скольжения 0° , как наиболее неблагоприятном с точки зрения аэродинамики. Характеристики пружинных подвесов и соответствующий им масштаб скорости потока определены на этапе проектирования модели. Уровень демпфирования модели измерен и составляет $\delta = 0,02$, что соответствует требованиям отечественных и зарубежных нормативных документов, низкое значение уровня демпфирования обеспечивается жесткой металлической конструкцией макета и ее низкими диссипативными свойствами. Перемещения модели измеряются с помощью 4 оптических датчиков, которые работают по принципу триангуляции лазерного луча. Измерение не оказывает влияния на свободное движение подвешенной модели, изгиб и кручение измеряются таким же образом, путем добавления или уменьшения количества сигналов датчиков.

Скорость ветра измеряется с помощью трубки Пито, соединенной с высокочувствительным датчиком давления.

Все сигналы датчиков перемещения сначала проходят низкочастотный фильтр, затем оцифровываются с помощью 16-битового аналогово-цифрового преобразователя со скоростью 1000 значений в секунду. Статистический расчет

записанных данных позволяет получить средние значения, среднеквадратичное, максимальное, минимальное и т.д. для всех каналов измерения. Измерение перемещения проводится относительно нулевого уровня при скорости ветра равной 0 м/с.

Измерение устойчивости представлено 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 5.18–Рисунок 5.22).

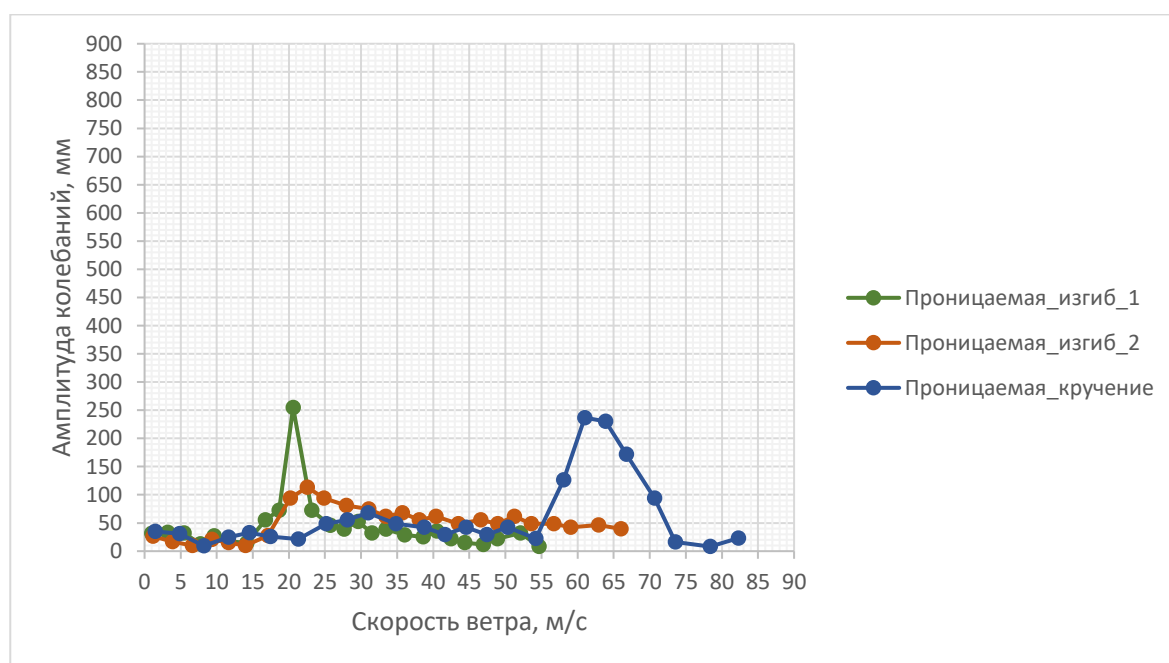


Рисунок 5.18– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, направление потока $\alpha = -5$

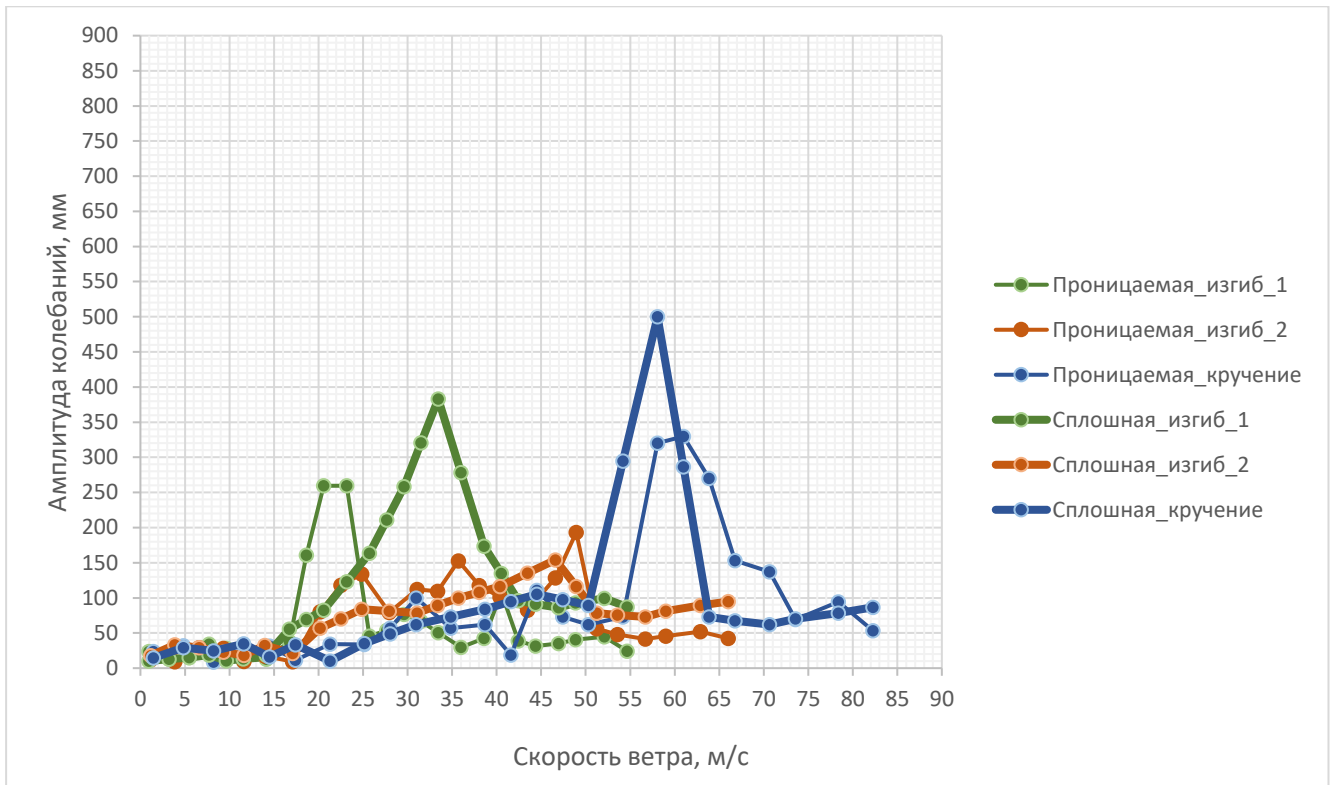


Рисунок 5.19 – Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, направление потока $\alpha = -3$ (пролет, расположенный в следе)

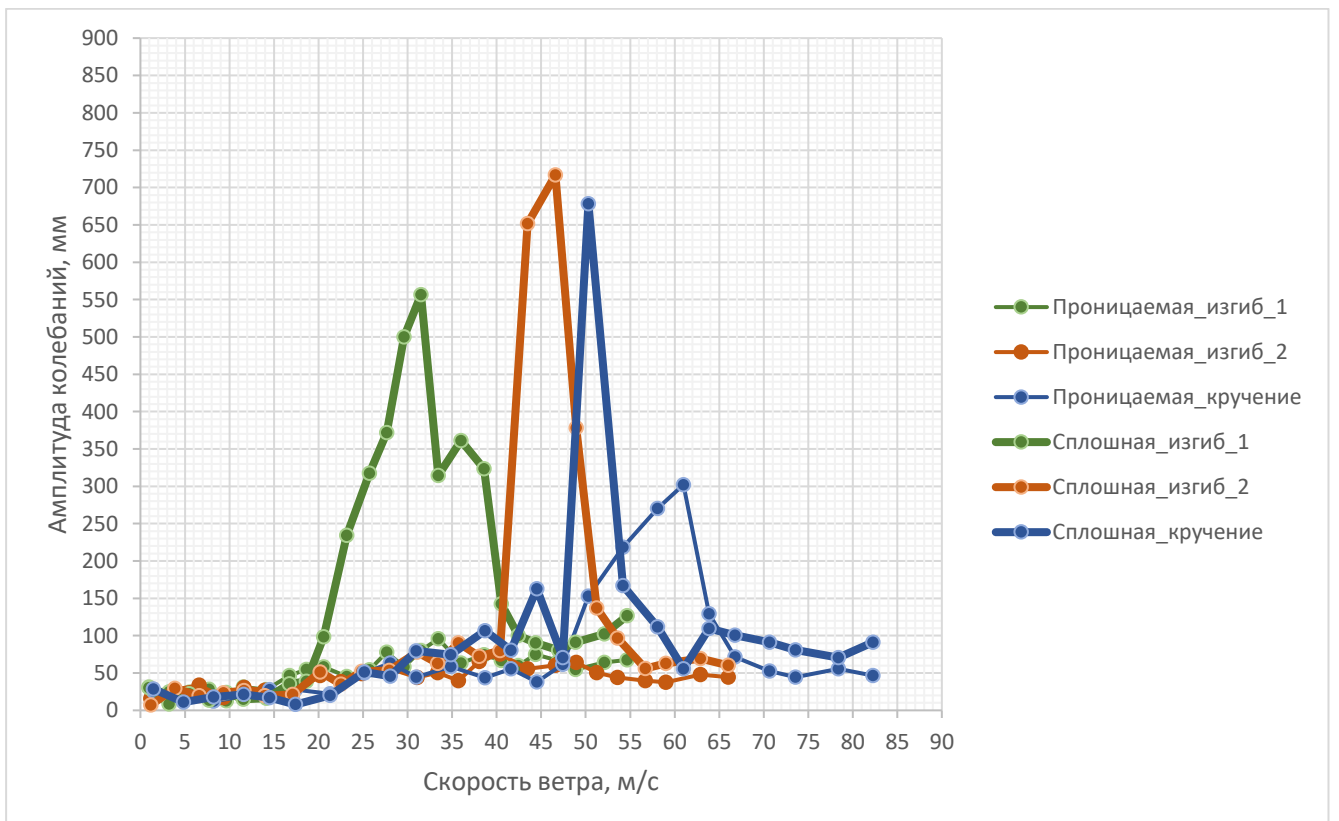


Рисунок 5.20– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, направление потока $\alpha = 0$

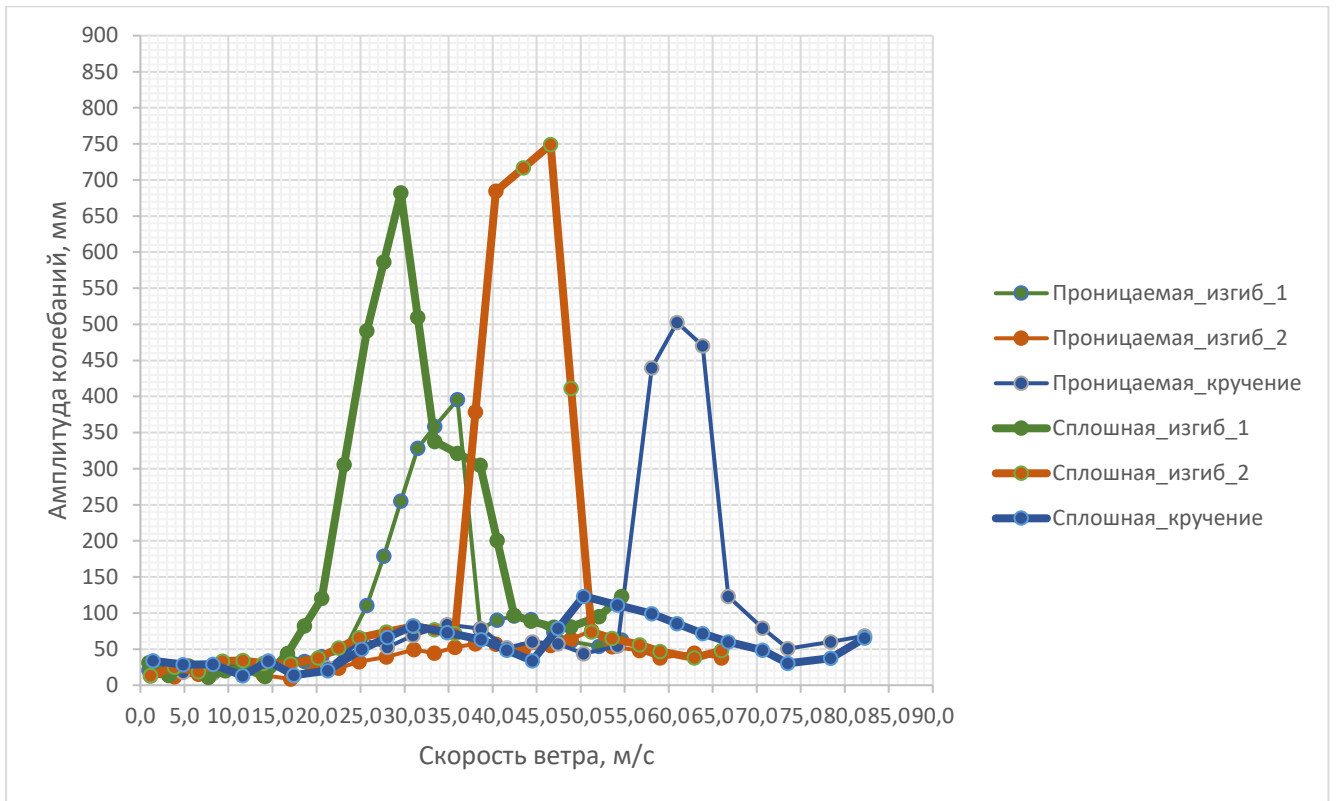


Рисунок 5.21– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, направление потока $\alpha = +3$

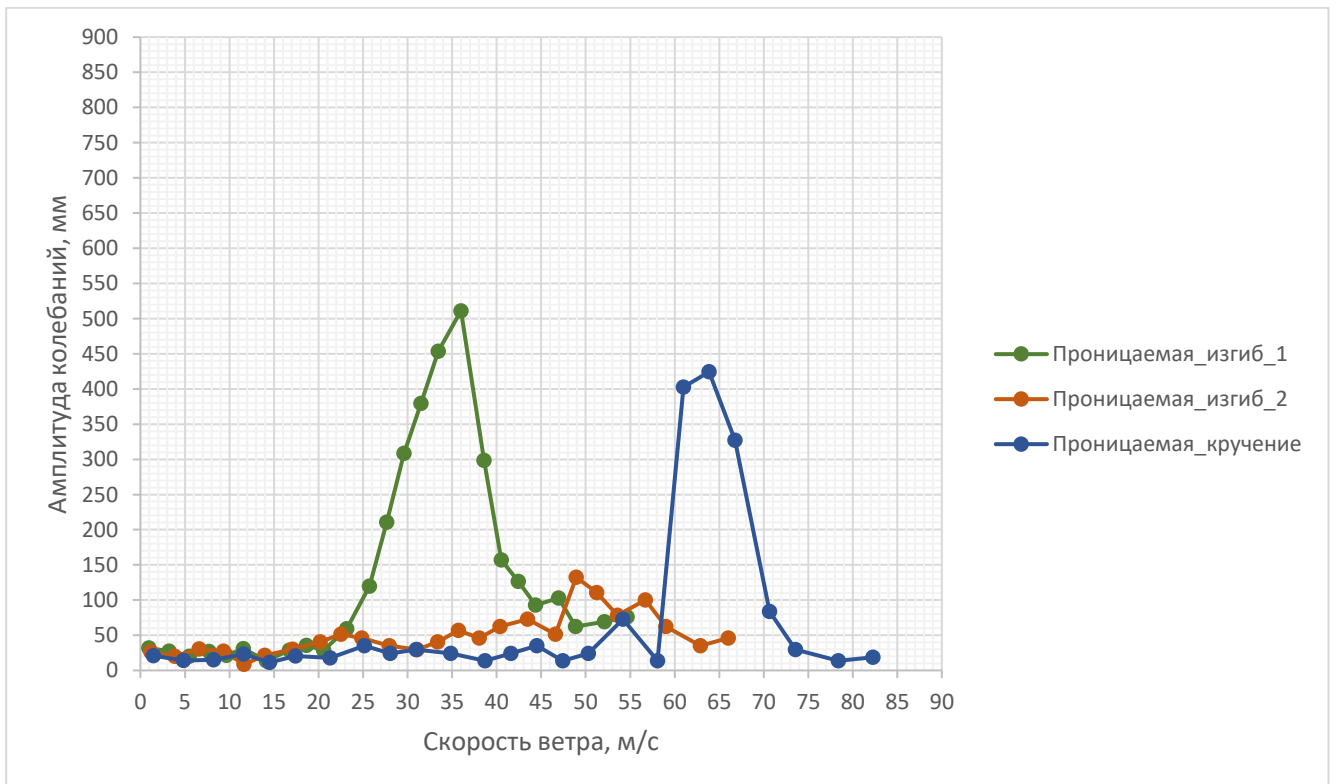


Рисунок 5.22– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, направление потока $\alpha = +5$

Таким образом, динамические испытания модели с $\delta = 0,02$ показали, что проницаемая конструкция защитного экрана, предпочтительней с точки зрения аэродинамики пролетного строения. Тем не менее по результатам экспериментального исследования устойчивости пролетного строения с проницаемым защитным экраном также выявлено явление вихревого возбуждения на следующих скоростях ветра:

- при направлении потока - 3° при скорости потока от 18 до 25 м/с с увеличением амплитуды колебаний до 260 мм при частоте колебаний 0,48 Гц;
- при направлении потока 0° при скорости потока от 47 до 64 м/с с увеличением амплитуды колебаний до 300 мм при частоте колебаний 1,33 Гц;
- при направлении потока + 3° при скорости потока от 23 до 38 м/с с увеличением амплитуды колебаний до 400 мм при частоте колебаний 0,48 Гц;
- при направлении потока + 5° при скорости потока от 23 до 44 м/с с увеличением амплитуды колебаний до 510 мм при частоте колебаний 0,48 Гц.

С целью повышения аэродинамической устойчивости конструкции предложено применение аэродинамического обтекателя по эскизу предоставленному на Рисунок 5.23.

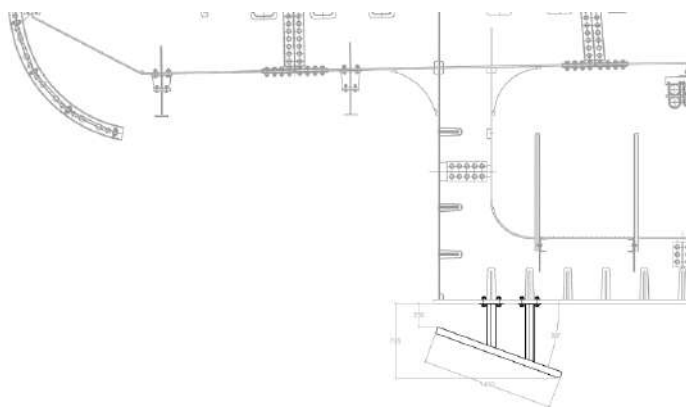


Рисунок 5.23– Эскиз аэродинамического обтекателя (Вариант 1)

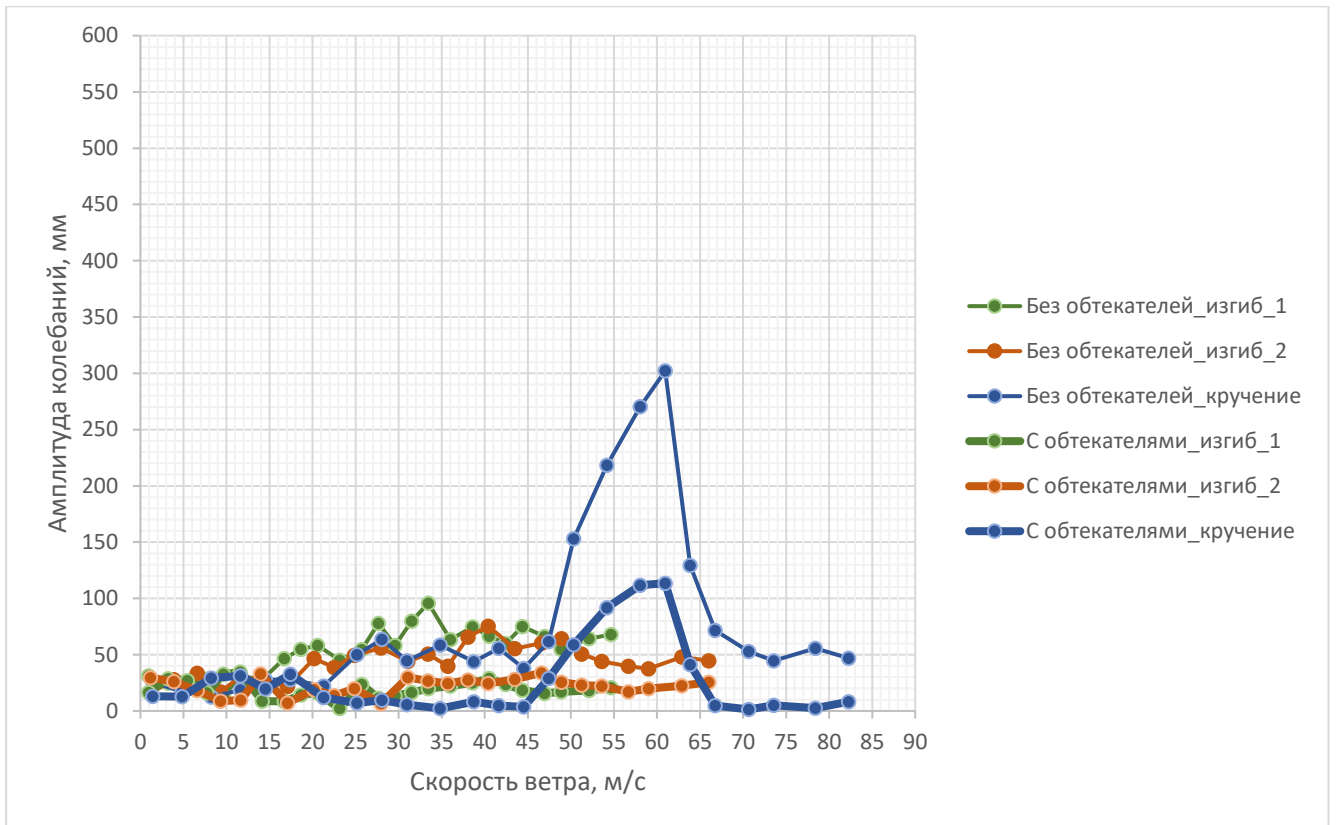


Рисунок 5.24– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, направление потока $\alpha = 0$ (Вариант 1)

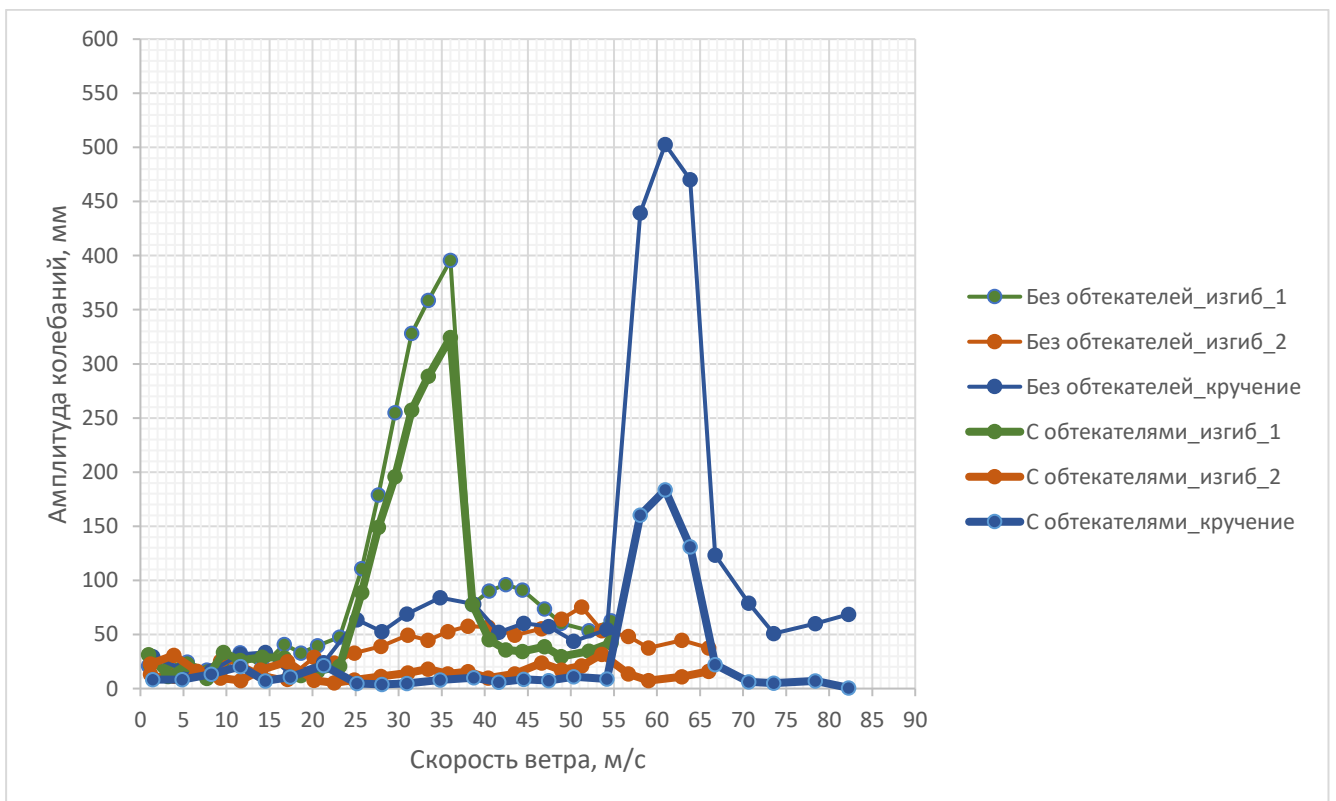


Рисунок 5.25– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, направление потока $\alpha = +3$ (Вариант 1)

По результатам дополнительного экспериментального исследования устойчивости выявлено явление вихревого возбуждения на следующих скоростях ветра:

- при направлении потока 0° при скорости потока от 47 до 64 м/с с увеличением амплитуды колебаний до 113 мм при частоте колебаний 1,33 Гц;
- при направлении потока $+3^\circ$ при скорости потока от 25 до 38 м/с с увеличением амплитуды колебаний до 330 мм при частоте колебаний 0,48 Гц.

С использованием аэродинамического обтекателя устойчивость пролетного строения в целом повышается, амплитуда колебаний при направлении потока 0° снизилась более чем в 2 раза. При восходящем ветре (направления потока $+3^\circ$ и $+5^\circ$) амплитуда колебаний снижается незначительно.

С целью повышения устойчивости конструкции и уменьшения амплитуды изгибных колебаний рекомендуется предпринять меры для исключения явлений вихревого резонанса (рассмотреть возможность увеличения уровня демпфирования и/или проведение дополнительных исследований с модифицированным обтекателем). Эскиз модифицированного аэродинамического обтекателя (Вариант 2) приведен на Рисунок 5.26.

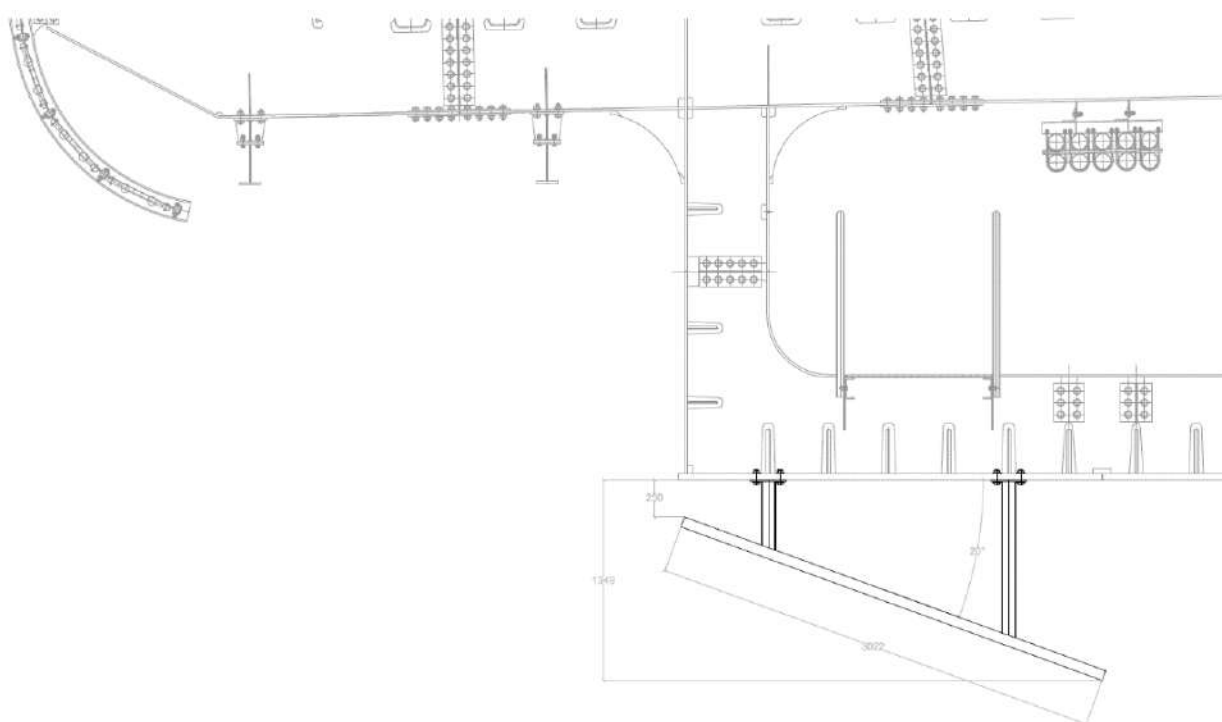


Рисунок 5.26– Эскиз аэродинамического обтекателя (Вариант 2)

Дополнительно проведены дополнительные испытания аэродинамического обтекателя по эскизу предоставленному на Рисунок 5.27 (Вариант 3).

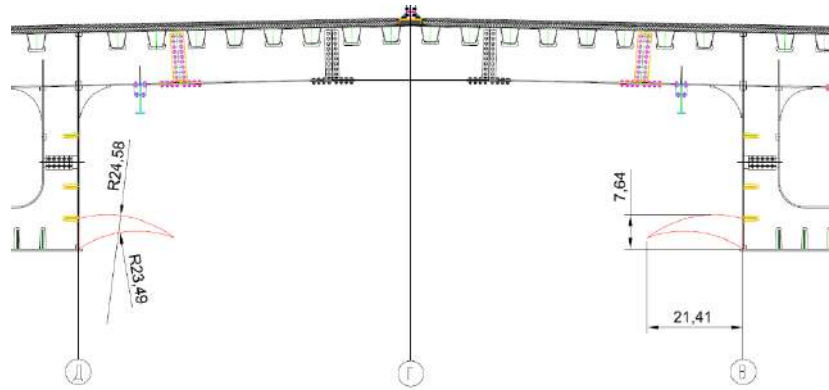


Рисунок 5.27 – Эскиз аэродинамического обтекателя (Вариант 3)

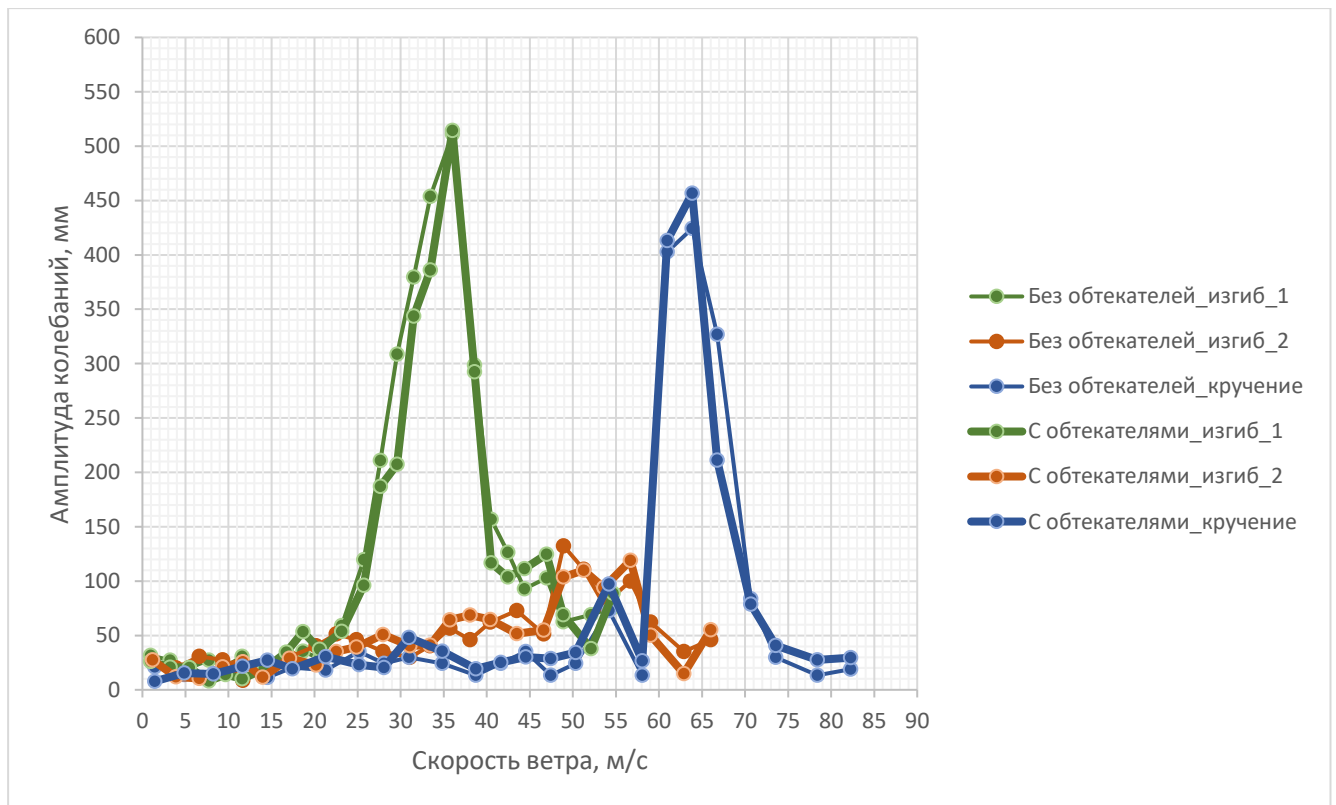


Рисунок 5.28– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, направление потока $\alpha = +5$ (Вариант 3)

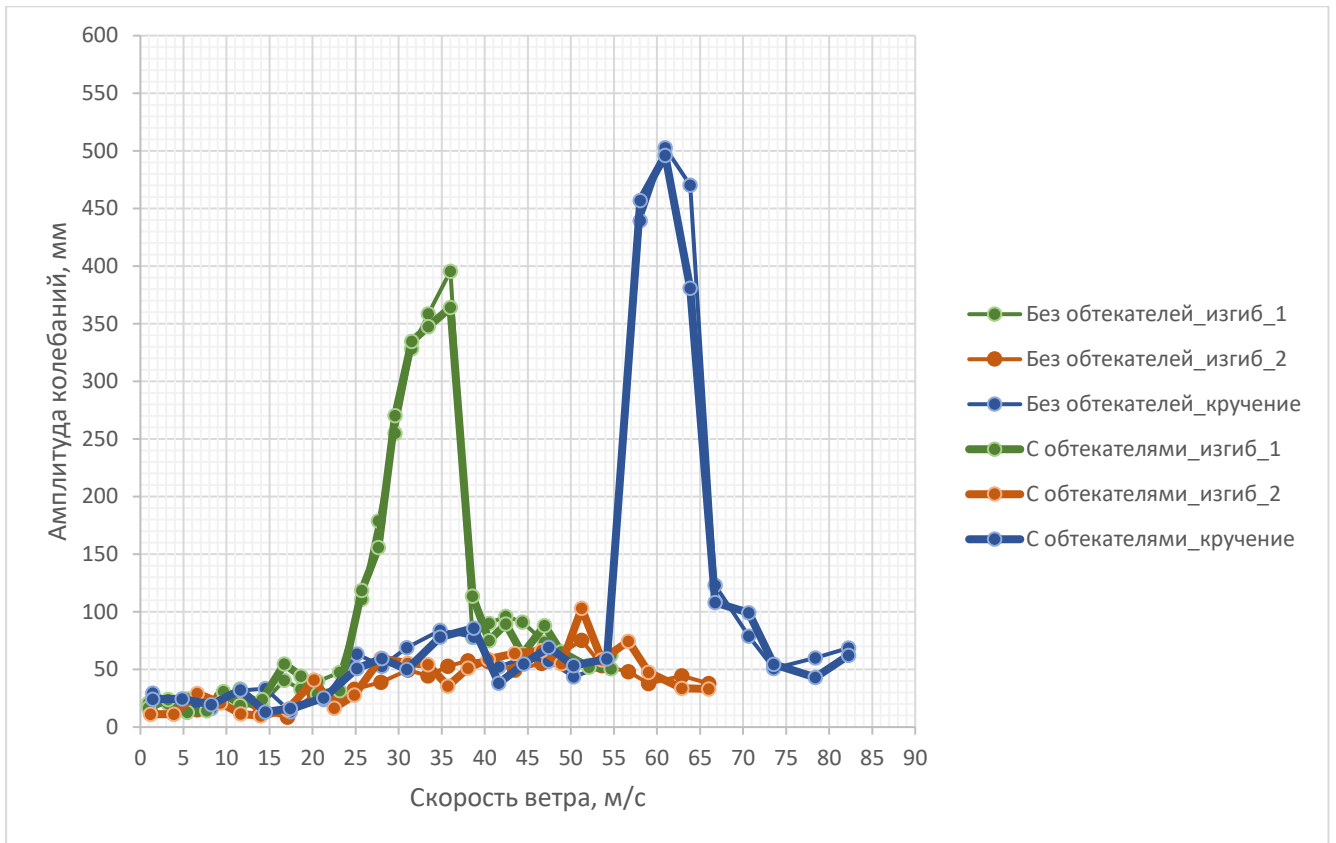


Рисунок 5.29– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, направление потока $\alpha = +3$ (Вариант 3)

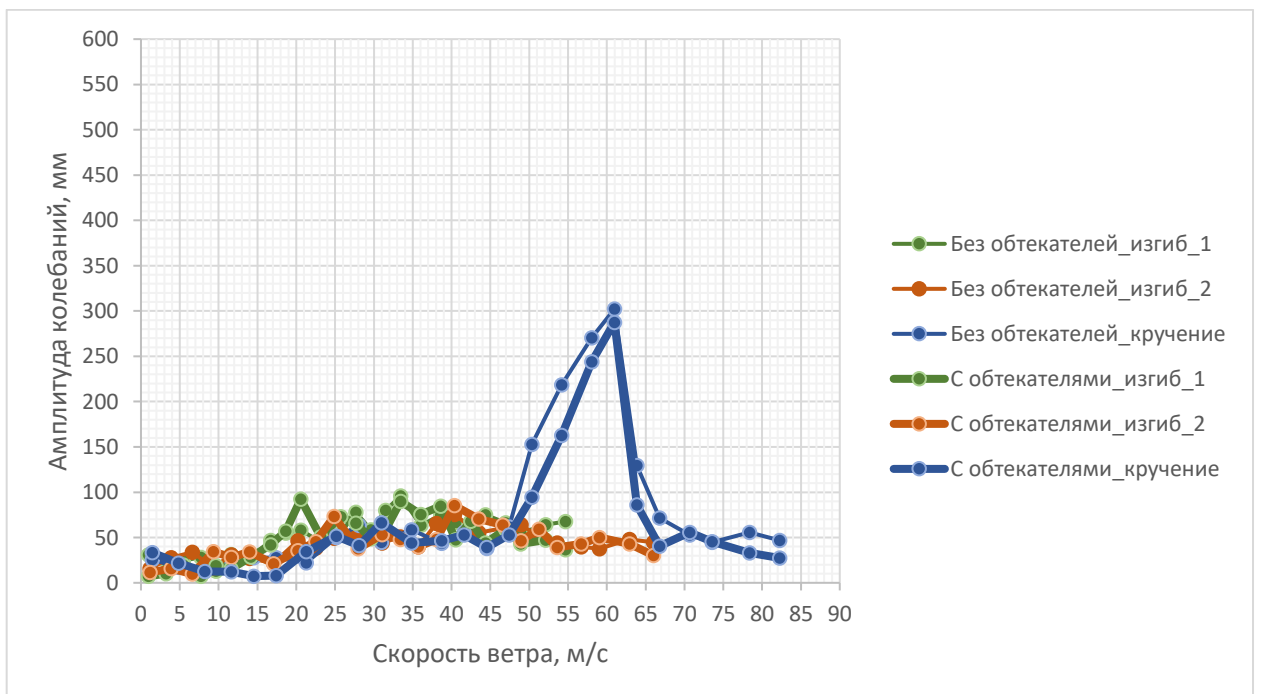


Рисунок 5.30– Зависимость амплитуды колебаний пролетного строения моста от скорости ветра, направление потока $\alpha = 0$ (Вариант 3)

По результатам дополнительного экспериментального исследования устойчивости с выявлено явление вихревого возбуждения на следующих скоростях ветра:

- при направлении потока 0° при скорости потока от 47 до 64 м/с с увеличением амплитуды колебаний до 287 мм при частоте колебаний 1,33 Гц;
- при направлении потока $+3^\circ$ при скорости потока от 23 до 38 м/с с увеличением амплитуды колебаний до 365 мм при частоте колебаний 0,48 Гц;
- при направлении потока $+5^\circ$ при скорости потока от 23 до 44 м/с с увеличением амплитуды колебаний до 510 мм при частоте колебаний 0,48 Гц.

С использованием аэродинамического обтекателя (Вариант 3) амплитуда колебаний пролетного строения при направлении потока не изменилась, по сравнению с первоначальной конструкцией, без использования обтекателей, с проницаемым экраном.

5.3. ВОЗНИКНОВЕНИЕ НАЛЕДИ И СОПУТСТВУЮЩИЕ РИСКИ

В нормативно технической документации гололедная нагрузка определяется посредством представления массы обледенения, это часто совмещается с воздействием ветровой нагрузки на различные типы сооружений и их частей, которые могут подвергаться обледенению. Некоторые конструкции обладают дополнительной чувствительностью к воздействию гололедной нагрузки, например, растянутые и сжатые тонкие протяженные элементы, обледенение которых приводит к увеличению возникающих продольных усилий, также дополнительная нагрузка от обледенения может кратно увеличивать нормативную нагрузку и быть критичной для узлов крепления, приводя к их деформированию и повреждению. Описанные элементы встречаются в вантовых, висячих, арочных и

ферменных мостовых переходах (Рисунок 5.31), два последних вида часто встречаются на отечественных железных дорогах и требуют особого внимания.

а)



б)



в)



Рисунок 5.31– Мостовые переходы, подверженные возникновению дополнительной гололедной нагрузки и имеющие различные расчетные схемы: а) вантовый, б) арочный, в) ферменный

Появляющаяся дополнительная гололедная нагрузка важна не только с точки зрения увеличения статической составляющей действующих сил, но и с точки зрения динамического поведения всей конструкции и ее отдельных элементов, например, она вызывает изменение собственных частот, что для низких форм, может являться определяющим при пропуске транспортных средств. Помимо этого, изменение поперечной формы сечения (Рисунок 5.32) за счет обледенения может привести к появлению дополнительного эксцентриситета для продольных усилий, который негативно сказывается на аэродинамическую устойчивость сжатых и растянутых элементов, вызывая их галопирование.

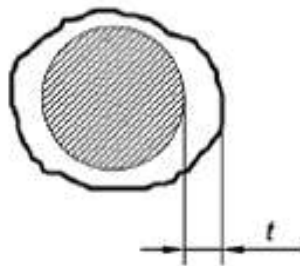


Рисунок 5.32– Модель изменения поперечного профиля элемента при обледенении, величина t представляет собой приведенную толщину слоя наледи

Результаты натурных экспериментов отечественных и зарубежных ученых, а также метеорологические исследования показывают, что полностью стаивание наледи не происходит и, так или иначе, она осыпается, при этом динамические воздействия на расположенные ниже элементы конструкций способны вызвать значительные дополнительные напряжения. Откол льда представляет опасность для работников, участвующих в технологических процессах по мониторингу, текущему содержанию и ремонту самого мостового сооружения, для пешеходов и транспортных средств. Уличную дорожную сеть, расположенную под мостом через бухту Золотой Рог в г. Владивосток (Рисунок 5.31 а) полностью закрывали для движения в ноябре 2020 года при угрозе падения глыб льда с несущих конструкций.

Стандартизация гололедных нагрузок затруднена из-за значительного разнообразия топографических и климатических условий в различных регионах нашей страны, поэтому для получения достаточно точной информации о частоте и интенсивности возникновения наледи обычно рекомендуются следующие методы: прямые многолетние измерения гололеда, моделирование возникновения наледи на основе известных метеорологических данных, сбор и анализ уже имеющихся наблюдений.

Образование наледи возможно из-за замерзающего дождя, изморози или внутриоблачного обледенения, при этом нарастание льда происходит примерно равномерно, если же образуются сосули, то наледь в этом случае приобретает асимметричную форму. Скорость образования гололедной обоймы зависит от

наличия и интенсивности атмосферных осадков, скорости и направления ветра, температуры воздуха. Существенными являются топографические особенности местности расположения мостового перехода, к которым относится расстояние от берега водоема, высота над уровнем моря, расположение горной местности (с наветренной стороны). Образование гололеда на конструкциях с решетчатой структурой усугубляется наличием узлов, в которых пересекаются несколько конструктивных элементов, в этом случае дополнительная гололедная и ветровая нагрузка может превосходить допустимые значения.

Образование наледи представляет опасность не только с точки зрения возникновения дополнительной нагрузки и возможного превышения значений напряжений и перемещений установленных нормативами значений, но и с точки зрения выполнения различных работ в непосредственной близости от образования гололеда.

Согласно Распоряжению ОАО «РЖД» в части требований охраны труда при производстве работ на мостах настилы и подмости должны быть очищены от снега и льда, а также посыпаны песком. При учете временных нагрузок гололедная нагрузка может учитываться как отдельно, так и в сочетании с другими временными нагрузками, особенно при использовании машин и оборудования для перемещения складированных материалов. Если рассматривается совместное действие ветровой и гололедной нагрузки, то необходимо учитывать коэффициенты сочетаний, зависящие от типа покрываемых гололедом элементов.

Плотность гололедного образования может колебаться от 100 до 900 кг/м³, наименьшая плотность соответствует изморози, а наибольшая гололеду, также может образовываться смесь из этих двух компонент наледи. По интенсивности образования гололеда различают пять районов, для каждого из которых в порядке возрастания толщина стенки ледового образования (t на Рисунок 5.32) составляет соответственно 5, 10, 15, 20, 25 мм.

Для расчета гололедной нагрузки необходимы данные об интенсивности образования наледи (чаще всего учитывается толщина образовавшегося на элементе конструкции гололеда) и ее плотности. Важным фактором образования

дополнительной нагрузки является температура воздуха и скорость ветра. При отсутствии метеостанций и климатологических справочников первоначальные данные для определения гололедной нагрузки определяются по картам районирования. При оценки профессиональных рисков при проведении работ на искусственных сооружениях, расположенных в горной или пересеченной местности, толщину ледового покрова на элементах конструкции рекомендуется уточнять дополнительно, т.к. рельеф оказывает существенное влияние на образование гололедного слоя. Также требуется учитывать характерный геометрический размер поперечного сечения элемента конструкции (d), образование наледи на котором рассматривается, для этого вводится поправочный коэффициент k_d , уменьшающийся с увеличением размера сечения ($k_d = 1; 0.9; 0.8$ для $d = 10; 20; 30$ мм соответственно). Интенсивность образования наледи зависит и от характера окружающей местности, для учета этого вводится коэффициент k_v , который равен 0.8, если сооружение находится в лесу или в городской застройке, объекты которой превышают высоту исследуемого перехода, на открытой и ровной местности $k_v = 1.1$, а если, например, сооружение возвышается на 30 метров над окружающей местностью, то $k_v = 1.6$.

В общем случае гололедную нагрузку можно представить в виде соотношения

$$q_e = \frac{p_e q_H 10^{-9} \pi (D^2 - d^2)}{4}. \quad (5.1)$$

Здесь d, D – характерный размер поперечного сечения элемента конструкции мостового перехода (мм) с учетом и без учета образовавшегося слоя наледи соответственно; t — толщина слоя наледи (Рисунок 5.32) (мм) с учетом коэффициентов k_d, k_v ; q_e – плотность образующейся наледи (кг/м³); q_H – приведенное нормативное значение по району.

Поскольку образование дополнительной гололедной нагрузки напрямую связано с температурными воздействиями, то имеет смысл построить распределение температурных полей в непосредственной близости от рассматриваемого элемента конструкции.

Уравнение теплопроводности для отдельного элемента прямоугольной формы $D = \{0 \leq x \leq 1, 0 \leq t \leq 1\}$ можно представить в виде:

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + f(x, t), (x, t) \in D; \quad (5.2)$$

начальные условия при этом можно записать следующим образом

$$\begin{aligned} u|_{t=0} &= u_0(x); \\ u|_{x=0} &= u|_{x=1} = 0. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Для решения определяющего уравнения необходимо 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:

$$x_\mu = \frac{1}{2}(z_\mu + 1); z_\mu = \cos \chi_\mu; \chi_\mu = \frac{(2\mu - 1)\pi}{2m}; \mu = 1, 2, \dots, m \quad (5.4)$$

А затем используем интерполяционную формулу для определения второй производной по координате в (5.2)

$$q(x) = \sum_{\mu=1}^m \frac{T_m(x)(x-1)xq_k}{m \frac{(-1)^{\mu-1}}{\sin \chi_\mu} (x_\mu - 1)x_\mu(z - z_\mu)}, q_\mu = q(x_\mu), z = 2x - 1. \quad (5.5)$$

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

$$t_\nu = \frac{1}{2}(z_\nu + 1), z_\nu = \cos \chi_\nu, \chi_\nu = \frac{(2\nu - 1)\pi}{2k}, \nu = 1, 2, \dots, k. \quad (5.6)$$

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

$$q(t) = \sum_{\nu=1}^k \frac{T_m(t)tq_\nu}{m \frac{(-1)^{\nu-1}}{\sin \chi_\nu} t_\nu(z - z_\nu)}. \quad (5.7)$$

Решение задачи распределения температурного поля вблизи элемента конструкции позволит определить критический уровень температуры, который наряду с воздействием вибрационной нагрузки может привести к откалыванию наледи и падению ее фрагментов вниз.

Предлагаемое алгоритмическое и математическое обеспечение, позволит конкретизировать появляющиеся риски и сформулировать условия их возникновения, это с совмещением с методом «контрольных листов» позволяет идентифицировать опасности и риски, а также позволяет оценить эффективность средств управления. Контрольные листы разрабатывают на основе полученного ранее опыта: законов, результатов предыдущей оценки риска, они позволяют проверить насколько полно рассмотрели проблему. Это простая форма идентификации риска, так как от участника опроса не требуется специальных экспертных знаний. Для каждого конкретного случая, конкретной профессии составляется контрольный лист на основании информации об объекте и экспертных оценках по проблемам, исходя из поставленной цели.

5.4. ВЫЯВЛЕНИЕ ОПАСНЫХ ЗОН ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ

Для выявления опасных зон при проведении работ на объектах транспортной инфраструктуры проводится анализ распределений модуля скорости потока по полю течения.

При выявлении опасных зон при проведении работ на объектах транспортной инфраструктуры важно учитывать особенности ветровых режимов, характерных для местности, в которой находятся соответствующие объекты. Например, может оказаться, что наиболее часто повторяющиеся направления ветра соответствуют наиболее неблагоприятным картинам обтекания (с наибольшим локальным ускорением потока). В таких случаях вблизи объекта будут находиться области, в которых, будет «постоянно ветрено». И наоборот, даже если при некоторых направлениях ветра будет наблюдаться существенный разгон потока вблизи объекта, но эти неблагоприятные направления ветра будут иметь относительно небольшую частоту встречаемости, то с точки зрения рабочих нахождение вблизи объекта будет комфортным. В любом случае, оценка безопасности пребывания при производстве работ на объектах транспортной инфраструктуры с использованием

пространственных картин обтекания объектов и данных о частотах появления сильных ветров в зависимости от их направления позволит выявить наиболее благоприятные и неблагоприятные области пространства.

Необходимо учитывать, что местные значения скорости потока зависят от скорости набегающего потока, поэтому целесообразно рассмотреть распределения безразмерного параметра Q_{crit} – относительная скорость ветра:

$$Q_{crit} = \frac{V_{max}}{V_p}, \quad (5.8)$$

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

С использованием распределения параметра Q_{crit} можно получить распределения скорости потока при любых значениях скорости ветра. Для этого необходимо умножить параметр Q_{crit} на величину скорости ветра вдали от объекта.

Пример выявления опасных зон при производстве работ на объектах транспортной инфраструктуры приведен ниже (Рисунок 5.33).

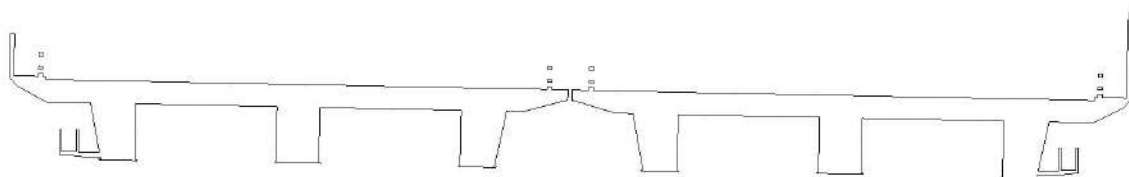


Рисунок 5.33– Поперечное сечение мостового перехода

Распределение безразмерного параметра Q_{crit} в различных сечениях моста приведено на Рисунок 5.34 и Рисунок 5.35.

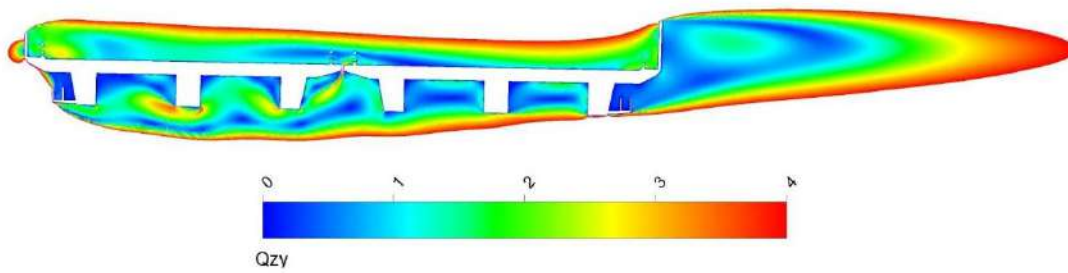


Рисунок 5.34– Относительная скорость Q_{crit} (сечение ZOY)

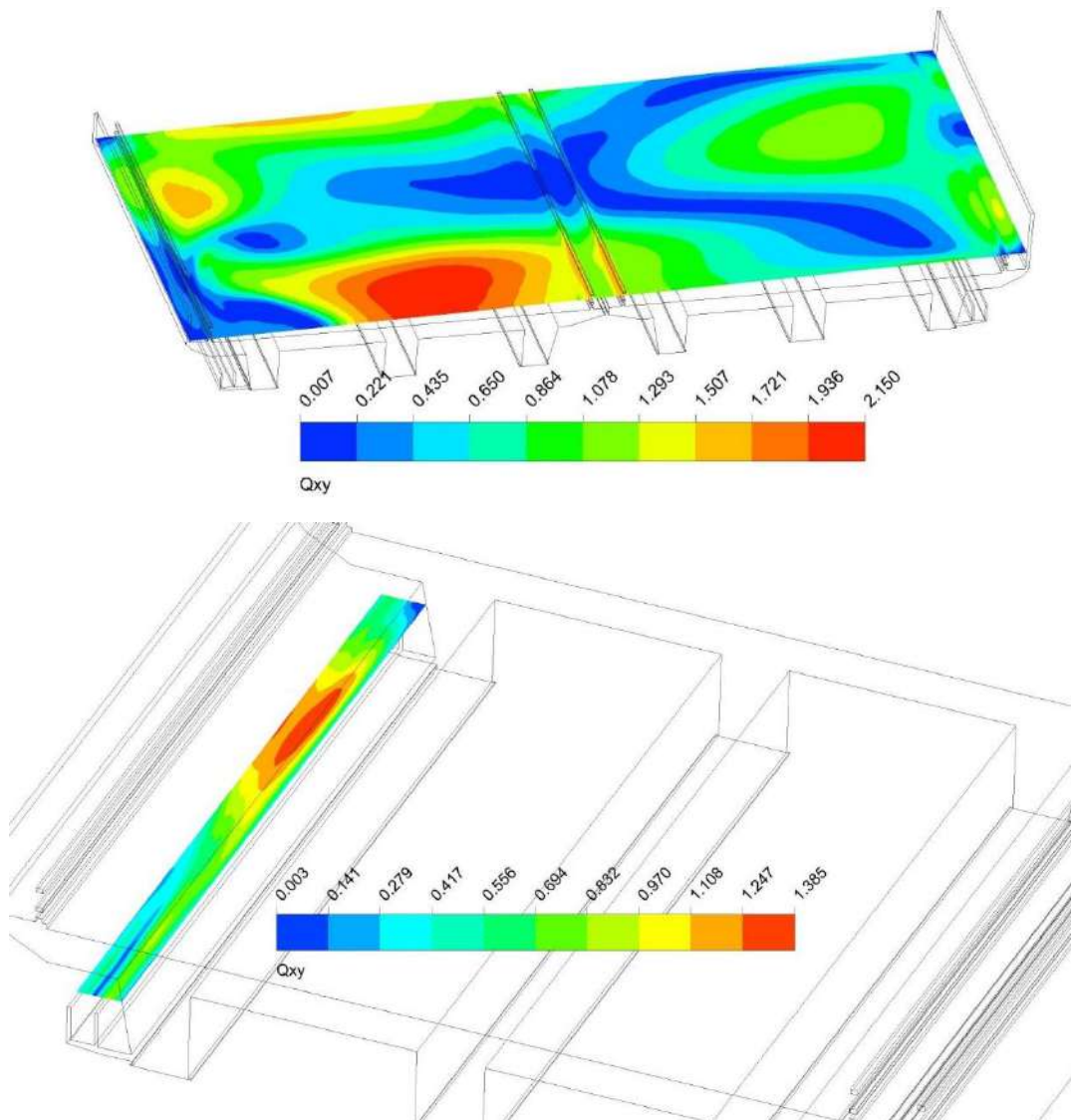


Рисунок 5.35– Относительная скорость Q_{crit} (сечение XOY)

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).

5.5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ГЛАВЕ 5

В результате использования методик, алгоритмов и подходов, описанных в ранее рассмотренных разделах диссертации выявлены неблагоприятные места для нахождения работников при проведении работ в рамках производственных и технологических процессов на объекте транспортной инфраструктуры и в непосредственной близости от него. Важным является также тот факт, что рассчитаны не только координаты опасных зон, но и приводится процесс их зарождения и развития.

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.

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.

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).

В целом, 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 облоймы, 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамович, Г.Н. К расчету разрежения за плоской струей и системой круглых струй, выдуваемых под углом к ограниченному сносящему потоку / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, А.Н. Гришин А.Н. // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1985. № 2. С. 3.
2. Аксенов, В.А. Анализ эффективности и пути развития цифровой платформы в системе управления охраной труда в ОАО «РЖД» / В.А. Аксенов, А.М. Завьялов, В.И. Апатцев, В.С. Чаплыгин, Е.А. Сорокина // Наука и техника транспорта. – 2019. – № 3. – С. 112-117.
3. Аксенов, В.А. Аналитический обзор проблемы обеспечения безопасности труда на железнодорожном транспорте / В.А. Аксенов, В.С. Чаплыгин // Проблемы безопасности российского общества. – 2022. – № 2 (38). – С. 84-88.
4. Алгазин, С.Д. Флаттер пластины со смешанными краевыми условиями произвольной формы в плане / С.Д. Алгазин // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2022. – № 1. – С. 153-156.
5. Альметова, З.В. Закономерности формирования транзитного потенциала: научная монография / З.В. Альметова, Н.К. Горяев, О.Н. Ларин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – 188 с.
6. Альметова, З.В. Транспортная инфраструктура: учебное пособие / З.В. Альметова; под ред. О.Н. Ларина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 44 с.
7. Апатцев В.И. Методика оценки трудовых ресурсов на железнодорожных станциях // Наука и техника транспорта. 2020. № 3. С. 40-43.
8. Бабаков А.В., Белоцерковский О.М., Северинов Л.И. Численное исследование течения вязкого теплопроводного газа у тупого тела конечных размеров // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. 1975. № 3. С. 112.

9. Белостоцкий, А.М. О математическом (численном) моделировании для определения параметров экстремальных климатических воздействий на здания и сооружения / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов, И.Н. Афанасьева // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году. Сборник научных трудов РААСН. Российская академия архитектуры и строительных наук: сб. статей.* – Москва, 2020. – С. 49-54.
10. Белостоцкий, А.М. О математическом (численном) моделировании для определения расчётных снеговых нагрузок на большепролётные сооружения / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов, Н.А. Бритиков // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году. Сборник научных трудов РААСН. Российская академия архитектуры и строительных наук.* Москва: сб. статей. – Москва, 2020. – С. 55-60.
11. Буторина, М.В. Учет погрешностей при построении карт шума / М.В. Буторина, А.В. Осетров, В.В. Светлов, К.П. Фиев // *Noise Theory and Practice.* – 2020. – Т. 6. № 4 (22). – С. 81-89.
12. Бучинский, В.Е. Атлас обледенений проводов / В.Е. Бучинский — Л. : Гидрометеиздат, 1966. — 116 с.
13. Валуева, Е.П. Нестационарное турбулентное течение жидкости в круглой трубе / Е.П. Валуева, В.Н. Попов // *Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа.* – 1993. – № 5. – С. 150.
14. Высоцкая, Л.А. Обеспечение безопасности при строительстве мостовых сооружений / Л.А. Высоцкая, В.А. Аксенов // *Проблемы безопасности российского общества.* – 2022. – № 2 (38). – С. 55-60.

15. Горохов, Е.В. Ветровые и гололедные воздействия на воздушные линии электропередачи / Горохов Е.В., Казакевич М.И., Турбин С.В., Назим Я.В. – Донецк, 2005. – 348 с.
16. Горпиченко, В.М. Покрытие Большой Спортивной Арены стадиона в Лужниках / В.М. Горпиченко, В.Б. Микулин, А.В. Ханджи // Сборник научных трудов НИЦ «Строительство» Юбилейный выпуск 70 лет: сб. статей. – Москва, 1997. – С. 123-133.
17. Горшков, Э.В. Защита подземных частей зданий от воздействия плоских сейсмических волн / Э.В. Горшков, С.В. Кузнецов // Строительное производство. – 2020. – № 1. – С. 77-81.
18. ГОСТ 33390-2015. Дороги автомобильные общего пользования. Мосты. Нагрузки и воздействия : Межгосударственный стандарт : утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 1006-ст от 31.08.2016 : введен впервые : дата введения 08.09.2016 / разработ. АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт» (Технический комитет по стандартизации ТК 42 «Автомобильные дороги»). – Офиц. изд. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 26 с.
19. ГОСТ Р 59625-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Правила расчета и подтверждения аэроупругой устойчивости : Национальный стандарт Российской Федерации : утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 10-ст 18.01.2022 : введен впервые : дата введения 01.04.2016 / разработ. Обществом с ограниченной ответственностью «Мастерская мостов» (ООО «Мастерская мостов»), Открытым акционерным обществом «Институт Гипростроймост» (ОАО «Институт Гипростроймост»), Новосибирским государственным техническим университетом (НГТУ), Акционерным обществом «Институт Гипростроймост - Санкт-Петербург» (АО «Институт Гипростроймост - Санкт-Петербург»), Федеральным государственным унитарным предприятием «Крыловский государственный научный центр»

- (ФГУП «Крыловский государственный научный центр»). – Офиц. изд. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 41 с.
- 20.ГОСТ Р 56728-2015. Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции : Национальный стандарт Российской Федерации : утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 1892-ст 19.11.2015 : введен впервые : дата введения 01.05.2016 / разработ. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Научно-исследовательским институтом механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (НИИ механики МГУ)). – Офиц. изд. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 9 с.
- 21.Гувернюк, С.В. Вычислительная аэродинамика строительных сооружений. Задачи и методы / С.В. Гувернюк, О.О. Егорычев Поддаева О.И. [и др.] // Вестник МГСУ. – 2011. – № 2-2. – С. 113.
- 22.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 МГСУ. – 2011. – № 3-1. – С. 185-191.
- 23.Даренских, А.И. Разработка мероприятий по снижению травматизма работников при реконструкции гидротехнических сооружений / А.И. Даренских, В.А. Аксенов // Проблемы безопасности российского общества. – 2022. – № 1 (37). – С. 32-37.
- 24.Дмитриев Ф.Д. Крушения инженерных сооружений. Историко-технические очерки. Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре. М. 1953. 188 с.
- 25.Дюк, В.А. Распознавание транспортных средств по силуэтам -трехкаскадный метод машинного обучения в системах технического зрения / В.А. Дюк, И.Г. Малыгин, В.И. Прицкер // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – № 2-1 (56) – С. 162-167.

- 26.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.
- 27.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.
- 28.Енджиевский, Л.В. История аварий и катастроф: моногр. / Л.В. Енджиевский, А.В. Терешкова. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 440 с.
- 29.Еремин, К.И. Реестр аварий зданий и сооружений 2001-2020 годов / К.И. Еремин, Н.А. Махутов, Г.А. Павлова, Н.А. Шишкина. – М., 2011. – 320 с.
- 30.Завьялов, А.М. Совершенствование системы управления охраной труда и безопасности производственных процессов / А.М. Завьялов, Т.С. Савельева // Проблемы безопасности российского общества. – 2022. – № 2 (38). – С. 80-83.
- 31.Зленко, Н.А. Аппроксимация результатов многопараметрического эксперимента при наличии нескольких подобластей регулярности / Н.А. Зленко // Материалы Тринадцатой Международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики»: сб. статей. – Москва, 2013. – С. 95-97.
- 32.Казакевич, М.И. Аэродинамика инженерных сооружений / М.И. Казакевич. – Москва : Ин-т Гипростроймост, 2014. – 167 с.
- 33.Казакевич, М.И. Аэродинамика мостов / М.И. Казакевич. – М. : Транспорт, 1987. – 240 с.
- 34.Казакевич, М.И. Ветровая безопасность конструкций. Теория и практика : моногр. / М.И. Казакевич. – Москва : Ин-т Гипростроймост, 2015. – 287 с.
- 35.Казакевич, М.И. Классификация аэродинамических экспериментальных исследований / М.И. Казакевич // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2011. – № 4 (90). – С. 154-157.
- 36.Казакевич, М.И. Основы расчетов сооружений на ветровые воздействия : моногр. / М.И. Казакевич. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство МИСИ-МГСУ, 2020. – 190 с.

37. Кирпичников, В.Ю. Экспериментальные исследования эффективности вибропоглощающего покрытия с металлическим армирующим слоем различной толщины / В.Ю. Кирпичников, А.И. Сятковский, А.Е. Шашурин, А.В. Кудаев // *Noise Theory and Practice*. – 2022. – Т. 8. № 1 (28). – С. 29-34.
38. Копытенкова, О.И. Фактор непогашенного ускорения при эксплуатации транспортных средств / О.И. Копытенкова, Е.Н. Дубровская, Л.А. Леванчук // *Гигиена и санитария*. – 2022. – Т. 101. № 8. – С. 910-914.
39. 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.
40. Кулеш В.П., Курулюк К.А., Швардыгулов Г.Е. Измерения деформации модели крыла бесконечного размаха в потоке аэродинамической трубы Т-128 с помощью стереограмметрической системы VIC-3D / В книге: *Материалы XXXII научно-технической конференции по аэродинамике*. Жуковский, 2021. С. 76-77.
41. Курлянд, В.Г. Уроки аварий и катастроф мостов / В.Г. Курлянд, В.В. Курлянд // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. – 2019. – № 4. – С. 90-98.
42. Лебедева, И.В. Экспериментальные исследования для установления расчетных параметров снеговых нагрузок / А.В. Маслов, М.М. Березин // *Вестник НИЦ Строительство*. – 2020 – № 2. – С. 66-76.
43. 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.
44. 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.

45. 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.
46. Локтев, А.А. Моделирование воздействия городского рельсового транспорта на окружающую застройку / А.А. Локтев, Д.А. Локтев, Л.А. Илларионова // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2023. – № 1. – С. 52-60.
47. Майстренко, И.Ю. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 / И.Ю. Майстренко, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, А.В. Кокодеев // Транспортные сооружения. – 2017. – Т. 4, № 4. – URL : <https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf>. – DOI : 10.15862/13TS417.
48. Майстренко, И.Ю. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 3 / И.Ю. Майстренко, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, А.М. Успанов // Транспортные сооружения. – 2018. – №1. – URL : <https://t-s.today/PDF/08SATS118.pdf>. – DOI : 10.15862/08SATS118.
49. Малыгин, И.Г. Классификация изображений чрезвычайных ситуаций на автомобильном транспорте по статистическим и амплитудным свойствам / И.Г. Малыгин, О.А. Королев // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2021. – № 1. – С. 125-134.
50. 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.
51. Медунецкий, В.М. Опыт единичного и мелкосерийного производства оптико-механических систем / В.М. Медунецкий, С.В. Солк, О.А. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 7. – С. 600-604.

52. МГСН 4.19-05. Многофункциональные высотные здания и комплексы : Региональные нормативы градостроительного проектирования : Утв. постановлением Правительства Москвы № 1058-ПП от 28.12.2005 : введен впервые : дата введения : с момента опубликования / разраб. ОАО ЦНИИЭП жилища (головная организация), ФГУ ВНИИПО МЧС России, ВАН КБ, ФГУП КТБ ЖБ, ГУП МНИИТЭП, МГСУ, НИИ ВДПО ОПБ, ГУП НИИЖБ, НИИОСП им. Н.М.Герсеванова, НИиПИ генплана г.Москвы, ОАО Моспроект, НИИСФ РААСН, ФГУП СантехНИИпроект, ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко, АВОК, ПНИИИС. – Офиц. изд. – Москва. – 2005. – 71 с.
53. МДС 20-1.2006. Временные рекомендации по назначению нагрузок и воздействий, действующих на многофункциональные высотные здания и комплексы в Москве (Дата актуализации: 12.02.2016) : Утв. приказом ФГУП «НИЦ «Строительство» № 113 от 26.07.2006. / разраб. лабораторией теории сооружения ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко – филиалом ФГУП «НИЦ «Строительство» при участии ЗАО ЦНИИЭП им. Б.С. Мезенцева, ФГУП ПНИИИС. – Офиц. изд. – Москва. – 2006. – 27 с.
54. Мусаев, В.К. Компьютерное моделирование нестационарных упругих волн напряжений в консоли и десятиэтажном здании при фундаментальном воздействии в виде функции Хевисайда / В.К. Мусаев // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2022. – Т. 14, № 2. – С. 187-196.
55. Мусаев, В.К. Математическое моделирование гасителя волн из резины в консоли с основанием при сейсмическом воздействии / В.К. Мусаев // Математика: теоретические и прикладные исследования. материалы Всероссийской научно-практической конференции: сб. статей. – Москва, 2022. – С. 131-136.
56. Мусаев, В.К. О приоритетах при оценке безопасности потенциально опасных объектов / В.К. Мусаев, Ю.В. Прус, Л.Э. Шварцбург Л.Э. [и др.] // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 2. – С. 6.

57. Мусаев, В.К. Об анализе различных причин аварий строительных объектов / В.К. Мусаев, В.А. Аксенов, Л.Э. Шварцбург Л.Э. [и др.] // Наука и техника транспорта. – 2017. – № 1. – С. 79-83.
58. Немировский, Ю.В. Продольно-поперечный изгиб физически-нелинейных железобетонных балок / Ю.В. Немировский, С.В. Тихонов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2021. – № 3 (49). – С. 85-93.
59. Овсянников, С.Н. Теоретические и экспериментальные исследования прохождения звука и вибрации на одноэтажной модели здания в связанных виброакустических системах / С.Н. Овсянников, О.В. Лелюга, Е.А. Лымарева, М.Д. Жулина // Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения. материалы XII Международной научно-практической конференции: сб. статей. – Томск, 2022. – С. 457-470.
60. Овчинников, И.И. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ из причин. Часть 2 / И.И. Овчинников, И.Ю. Майстренко, И.Г. Овчинников, А.В. Кокодеев // Транспортные сооружения. – 2017. – № 4. – С. 1-42.
61. Овчинников, И.И. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 4 / И.И. Овчинников, И.Ю. Майстренко, И.Г. Овчинников, А.М. Успанов // Транспортные сооружения. – 2018. – Т. 5, № 1.
62. Овчинников, И.И. Насколько уникальны колебания Волгоградского моста? / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, В.О. Филиппова // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2015. – № 6. – С. 81-91.
63. Овчинников, И.И. Танцующий мост в Волгограде: причины, аналогии, мероприятия. Часть 1. Причины / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, В.О. Филиппова // НАУКОВЕДЕНИЕ. – 2015. – Т. 7, № 6. – URL : <http://naukovedenie.ru/PDF/07KO615.pdf>. – DOI : 10.15862/07KO615.
64. Овчинников, И.И. Танцующий мост в Волгограде: причины, аналогии, мероприятия. Часть 2. Аналогии, мероприятия / И.И. Овчинников, И.Г.

- Овчинников, В.О. Филиппова // НАУКОВЕДЕНИЕ. – 2015. – Т. 7, № 6. – URL : <http://naukovedenie.ru/PDF/08KO615.pdf> . – DOI : 10.15862/08KO615.
65. 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.
66. Поддаева, О. И. Архитектурно-строительная аэродинамика / О.И. Поддаева, И.В. Дуничкин // Вестник МГСУ. – 2017. – № 6. – С. 602-609.
67. Поддаева, О.И. Архитектурно-строительная аэродинамика : учеб. пособие / О.И. Поддаева, А.С. Кубенин, П.С. Чурин. – Москва : НИУ МГСУ, 2015. – 89 с.
68. Поддаева, О.И. Аэродинамические испытания мостовых конструкций / О.И. Поддаева, П.С. Чурин // Научное обозрение. – 2013. – № 9. – С. 321-324.
69. 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.
70. 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.
71. 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.
72. 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.
73. 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. – Москва, 2019. – С. 419-423.
74. Поддаева, О.И. Экспериментальное исследование ветрового воздействия на высотный жилой комплекс с радиальной компоновкой / О.И. Поддаева, П.С. Чуринов // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования. Сборник докладов Первой Национальной конференции : сб. статей. – Москва, 2020. – С. 767-770.
75. 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.
76. Пономарев, В.П. О необходимости системного подхода к научным исследованиям в области комплексной безопасности и предотвращения аварий зданий и сооружений / В.П. Пономарев, В.И. Травуш, В.М. Бондаренко, К.И. Еремин // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2012. – URL : <http://ramag.ru/pressa/bss-pse>. – (дата обращения 04.06.2023).
77. Попов, Н.А. Воздействие ветровых и снеговых нагрузок на большепролетные покрытия / Н.А. Попов, И.В. Лебедева, Д.С. Богачев, М.М. Березин // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 12. – С. 71-76.
78. Порываев, И.А. Исследования ветровой и снеговой нагрузок на покрытия вертикальных цилиндрических резервуаров / И.А. Порываев, М.Н. Сафиуллин, А.А. Семенов // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 5. – С. 31.
79. Порываев, И.А. Совершенствование стационарных крыш вертикальных цилиндрических резервуаров [Текст]: дис...канд. техн. наук: 25.00.19: защищена 2016. / Порываев Илья Аркадьевич. – Уфа, 2016. – 265 с.
80. Пушенко, С.Л. Анализ производственного травматизма в строительной индустрии и пути его снижения / С.Л. Пушенко, В.Л. Гапонов, В.А. Кукареко // Безопасность техногенных и природных систем. – 2022. – № 2. – С. 24-30.

81. Платонов, А.С. Уроки аварий металлических конструкций мостов / А.С. Платонов // Транспортное строительство. – 2009. – № 6. – С. 6-9.
82. Райзер, В.Д. Нагрузки и воздействия / В.Д. Райзер, В.А. Отставнов // Сборник научных трудов НИЦ «Строительство» Юбилейный выпуск 70 лет: сб. статей. – Москва, 1997. – С. 34-40.
83. Ромбах, В.П. Почему не рухнул Волгоградский мост и как не допустить катастрофы / В.П. Ромбах // Вестник ВолГУ. – 2011. - № 10 (5). – С. 72-80.
84. Саврухин, А.В. Требования к вагонам-цистернам для перевозки опасных грузов / А.В. Саврухин, К.А. Сергеев, Р.А. Ефимов, Я.Д. Подлесников // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 10. – С. 50-53.
85. Сачкова, О.С. Обеспечение санитарно-эпидемиологической безопасности работников транспортного комплекса / О.С. Сачкова, А.А. Кириллин, Д.В. Климова // Наука и техника транспорта. – 2023. – № 1. – С. 101-112.
86. Светлов, В.В. Снижение уровней шума в жилой застройке от инженерно-технологического оборудования предприятий / В.В. Светлов // Noise Theory and Practice. – 2020. – Т. 6. № 4 (22). – С. 115-127.
87. Сычев, В.П. Выбор материалов и технологии для создания безопасного дымогазонепроницаемого барьера для работников / В.П. Сычев, А.Е. Можаров, В.А. Аксенов, Е.А. Киселева // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 1. – С. 94-100.
88. Сычева, А.В. Защита строительных металлических конструкций огнезащитными составами / А.В. Сычева, А.А. Локтев, А.Е. Можаров, В.П. Сычев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 2. – С. 89.
89. Соловьев, С.Ю. Аэродинамическая устойчивость большепролетных мостов / С.Ю. Соловьев // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2016. – №5 (66). – С. 47-50.
90. Свод правил: СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция. СНиП 2.01.07-85: нормативно-технический материал: утв.

- Приказом Минстроя России № 891/пр от 03.12.2016. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 95 с.
- 91.Свод правил: СП 35.13330.2011. Свод правил. МОСТЫ И ТРУБЫ. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*: нормативно-технический материал: утв. приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) № 822 от 28.12.2010. – Москва, 2011. – 341 с.
- 92.Свод правил: СП 338.1325800.2018. Защита от шума для высокоскоростных железнодорожных линий: нормативно-технический материал: утв. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации № 69/пр от 05.02.2018. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 77 с.
- 93.Теличенко, В.И. Безопасность эксплуатируемых зданий и сооружений: Монография / Под ред. В.И. Теличенко, К.И. Еремина. – М., 2011. – 428 с.
- 94.Титова, Т.С. Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты / Т.С. Титова, Ю.П. Бороненко, Е.Ю. Семенов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2022. – № 3 (71). – С. 20-24.
- 95.Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. – Москва, 2021.
- 96.Трофименко, Ю.В. Проблемные вопросы управления техносферной безопасностью транспортных систем / Ю.В. Трофименко // XIV ВСЕРОССИЙСКАЯ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ МКПУ-2021. Материалы XIV мультikonференции в 4 томах: сб. статей. – Ростов-на-Дону - Таганрог, 2021. – С. 96-100.
- 97.ТСН 31-332-2006. Санкт-Петербург. Жилые и общественные высотные здания: нормативно-технический материал: приняты и введ. в действие распоряжением Комитета по строительству Правительства Санкт-Петербурга № 68 от 23.12.2005. – Санкт-Петербург, 2006. – 58 с.

98. Федосова, А.Н. Моделирование ветровых воздействий на протяженные сооружения в реальных условиях эксплуатации с помощью методики анализа ветровых воздействий / А.Н. Федосова, П.С. Чуринов // Научное обозрение. – 2016. – № 21. – С. 43-46.
99. Филиппов, В.Н. Пути повышения пожаровзрывобезопасности эксплуатации цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов / В.Н. Филиппов, Г.И. Петров, Ю.Н. Шебеко [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т. 29, № 6. – С. 75-83.
100. Фомин, В.М. Учет функции распределения механических свойств металлов в динамических процессах деформирования и разрушения преград / В.М. Фомин, А.Е. Краус, Е.И. Краус [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 7. – С. 1671-1679.
101. Фомин, В.М. Численное исследование влияния встречной набегающему сверхзвуковому потоку холодной струи на суммарные аэродинамические характеристики затупленного тела / В.М. Фомин, Н.Д. Малмус, А.А. Маслов [и др.] // Доклады Академии наук: сб. статей. – Москва, 2000. – Т. 374, № 1. – С. 55-57.
102. Чуринов, П.С. Визуализация движения воздушного потока / П.С. Чуринов, О.И. Поддаева // Научное обозрение. – 2015. – № 9. – С. 106-110.
103. Чуринов, П.С. Проектирование макетов уникальных зданий и сооружений в экспериментальной аэродинамике / П.С. Чуринов, О.И. Поддаева, О.О. Егорычев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 332-335.5
104. 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.
105. 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.
106. Allegrini, J. Porous and Geometry-Resolved CFD Modelling of a Lattice Transmissionwer Validated by Drag Force and Flow Field Measurements, Engineering Structures / J. Allegrini, J. Maesschalck, G. Alessi // Engineering Structures. – 2018. – 168. – C. 462-472.
107. ANSI ASCE 7-02 American Standard of American Society of Civil Elilgineers SEI/ASCE 7-02 Second Edition Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures Revision of ASCE 7-98.
108. ASCE 74 Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading (third ed.), American Society of Civil Engineers. – USA, 2010.
109. Asgarian, B. Progressive collapse analysis of power transmission towers / B. Asgarian, S. Eslamlou, A. Zaghi [и др.] // Journal of Constructional Steel Research. – 2016 – Т. 123 – С. 31-40.
110. Australian/New Zealand Standard Structural design actions Part 2: Wind actions.
111. Balczo, M. Prediction of Wind Load Acting on Telecommunication Masts / M. Balczo // Responding to Tomorrow's Challenges in Structural Engineering. – 2006. – C. 23-30.
112. Belostotsky, A. Comparison of determination of snow loads for roofs in building codes of various countries / A. Belostotsky, N. Britikov, O. Goryachevsky // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Т. 17, № 3. – С. 39-47.
113. Belostotsky, A. Critical review of modern numerical modelling of snow accumulation on roofs with arbitrary geometry / A. Belostotsky, N. Britikov, O. Goryachevsky // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Т. 17, № 4. – С. 40-59.
114. Belostotsky, A. Critical review of physical modelling of snow accumulation on roofs with arbitrary geometry / A. Belostotsky, N. Britikov, O. Goryachevsky

- // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Т. 17, № 4 – С. 22-39.
115. Belostotsky, A. Simulation of aerodynamic instability of building structures on the example of a bridge section. Part 2: solution of the problem in a coupled aeroelastic formulation and comparison with engineering estimates / A. Belostotsky, I. Afanasyeva, I. Negrozova, O. Goryachevsky // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Т. 17, № 3. – С. 24-38.
116. Bociolone, M. Statistical analysis of extreme wind speeds in the Straits of Messina / Bociolone M., Gasparetto M., Lagomarsino S. [и др.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1993. – 48.2–3. – С. 359–377.
117. Borjan, A. Understanding Bridge Collapse / A. Borjan // UK, London : Taylor & Francis Group, 2008. – 282 с.
118. Cermak, J. E. Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures. / J. E. Cermak, N. Isyumov. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 1999.– 214 p.
119. Chao, L. A member-based porous method for predicting flow distortions around a lattice tower / Chao Li, Hong-Zhou Deng, Zi-Ye Yang [и др.] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2021. – Т. 218. – С. 104765.
120. Chen, B. Peak wind pressures on roof claddings of regular railway stations / Chen Bo, Bian Rongfeng, Chen Zhuolun [и др.] // Engineering Structures. – 2022. – Т. 259. – С. 114178.
121. Chen, B. Wind-Induced Response and Equivalent Static Wind Loads on Waiting Hall Building of Regular Railway Stations / Chen Bo, Zhao Heng, Wang Xiaohong, Wang Zekang // International Journal of Structural Stability and Dynamics. – 2022. – 22.
122. Chiodo, E Stochastic Extreme Wind Speed Modeling and Bayes Estimation under the Inverse Rayleigh Distribution / Chiodo, E [и др.] // Applied Sciences. – 2020. – Т. 10.16. – С. 5643.

123. Churin, P. Assessment of the influence of surrounding buildings on the wind impact on a high-rise residential complex / P. Churin, A. Fedosova, J. Gribach // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series: сб. статей. – 2020. – С. 1614(1).
124. Churin, P. Experimental study of the aerodynamic effects on the monument // P. Churin, A. Fedosova, O. Egorychev // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019: сб. статей. – Москва, 2020. – С. 012035.
125. Churin, P. Experimental study of wind and snow influence on the unique buildings and facilities / P. Churin, J. Buslaeva // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Т. 10, № 20. – С. 40841-40843.
126. 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.
127. Dallard, P. London Millennium Bridge: Pedestrian-induced lateral vibration / P. Dallard, T. Fitzpatrick, A. Flint [и др.] // J. Bridge Eng. – 2001. Т. 6. – С. 412–417.
128. Den Hartog, J. Mechanical vibrations / J. Den Hartog. – Dover Publications, 1985. – 464 с.
129. Deng, L. State-of-The-Art Review on the Causes and Mechanisms of Bridge Collapse / Lu Deng, Wei Wang, Yang Yu // Journal of Performance of Constructed Facilities. – 2015. – Т. 30. – С. 04015005.
130. Duan, Qing & Ma, Cun & Xie, Bin. (2013). Research on Aerodynamic Impacts of Snow on Bridge Decks. Advanced Materials Research. 774-776. 68-72. 10.4028/www.scientific.net/AMR.774-776.68.
131. 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. – Т. 12(2). – С. 177-182.

132. EN 1991-2 (2003): Eurocode 1: Actions on structures – Part 2 : Traffic loads on bridges.
133. EN 50341-1 Overhead Electrical Lines Exceeding AC 1 kV European Committee for Electrotechnical Standardization, Brussels, Belgium (2012).
134. ESDU 81027 81st Edition, April 1, 1982 Complete Document Lattice structures. Part 1: mean fluid forces on single and multiple plane frames.
135. ESDU 81028 81st Edition, December 1, 1993 Complete Document Lattice structures. Part 2: mean fluid forces on tower-like space frames.
136. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions. Action of structures: EUROCODE, pr. EN 1991-1-4:2004. — General actions, Wind.
137. Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 3-1: Towers, masts and chimneys - Towers and masts (2006).
138. Evstigneev, V. Non-stationary statistical estimation of wind speeds of rare recurrence in the Azov and Black Sea region / V. Evstigneev, V. Naumova, N. Lemeshko // Environmental Control Systems. – 2021. – Т. 3.45. – С. 15–22.
139. Farquharson, F. Wind forces on structures: structures subject to oscillation / F. Farquharson // Journal of the Structural Division. – 1958. – Т. 84, №. 4. – С. 1-16.
140. Fidler, T. A Practical Treatise on Bridge-Construction / T. Fidler. – C. Griffin. 1909. – 478 с.
141. Flaga, A. A New Approach to Wind Tunnel Similarity Criteria for Snow Load Prediction with an Exemplary Application of Football Stadium Roof / A. Flaga, G. Kimbar, P. Matys // 5th European & African Conference on Wind Engineering. – 2009. – С. 1-4.
142. Franke, J. Recommendations on the use CFD in wind engineering / J. Franke [и др.] // Cost action C. – 2004. – Т. 14.
143. Georgakis, C. Drag Coefficients of Lattice Masts from Full-Scale Wind-Tunnel Tests / C. Georgakis [и др.] // Proceedings EACWE 5. – 2009.

144. Gribach, J. Research methods of bioclimatic comfort at the residential area / J. Gribach, O. Poddaeva, P. Churin // E3S Web of Conferences. – 2019. – T. 91.
145. Gu, M. Numerical simulation of wind loads acting on roof of Shanghai railway station building Tongji Daxue Xuebao / M. Gu, W. Yang, Q. Fu, J.-L. Zhou // Journal of Tongji University. – 2004. – T. 32. – C. 141-146.
146. Guan, Q. Research on Soft Flutter of 420m-Span Pedestrian Suspension Bridge and Its Aerodynamic Measures / Q. Guan, L. Liu, H. Gao, Y. Wang, J. Li // Buildings. – 2022. – T.12(8). – C. 1173.
147. Guide for the assessment of wind actions and effects on structures National Research Council of Italy. CNR-DT 207/2008.
148. Holmes, J. Wind Loading of Structures / J. Holmes. – London: Spon Press, 2001. – 392 c.
149. IEC 60826 Design Criteria of Overhead Transmission Lines International Electro-technical Commission, Geneva, Switzerland.
150. Isyumov, N. Wind tunnel modeling of snow accumulations on large-area roofs / N. Isyumov, M. Mikitiuk // Proc., 2nd Int. Conf. On Snow Engineering. – 1992. – C. 181–193.
151. Isyumov, N. Wind tunnel model tests of snow drifting on a two-level flat roof / N. Isyumov, M. Mikitiuk // J. Wind Eng.Ind.Aerodyn. – 1990. – T. 36. – C. 893–904.
152. Irwin, P. Wind Tunnel Testing of High-Rise Buildings / P. Irwin, R. Denoon, D. Scott // An output of the CTBUH Wind Engineering Working Group, 2013. – 46 c.
153. Jamilur R.C. Bridge collapses around the world: Causes and mechanisms. / R.C. Jamilur, H. Ariful // IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III: сб. статей. – Bangladesh, 2015.
154. Jirsák, M. Experimental study of pedestrian wind comfort over railway-station platforms / M. Jirsák, D. Zachoval // ENGINEERING MECHANICS. – 2008. – C. 378-388.

155. Kabošová, L. Digitally Designed Airport Terminal Using Wind Performance Analysis // L. Kabošová, S. Kmet, D. Katunský // Buildings. – 2019. – Т. 9. – С. 15.
156. Kabošová, L. The search for an optimal architectural shape using wind performance analysis / L. Kabošová // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Т. 566. – С. 012012.
157. Kazakevitch, M. The aerodynamics of a hangar membrane roof / M. Kazakevich // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1998. – Т. 77-78. – С. 157-169.
158. Kind, R. Saltation Flow Measurements Relating to Modeling of Snowdrifting / R. Kind, S. Murray // J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics. – 1982. – Т. 10 (1). – С. 89–102.
159. Korkmaz, H. Excessive snow induced steel roof failures in Turkey / H. Korkmaz, Y. Dere, Y. Özkılıç [и др.] // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Т. 141. – С. 106661.
160. Kulekina, A. Research in aerodynamics of underground vehicle bodies / A. Kulekina, E. Langeman // Тезисы научно-практической конференции аспирантов и магистрантов «Progress through Innovation»: сб. статей. – 2015. – С. 71.
161. Kumar, T. Vinayagamurthy. Pressure Distribution on a Unique Curved Roof Airport Structure / T. Kumar, V. Ganesan. // PSG College of Technology. – 2019.
162. Lawson, T. The effects of wind on people in the vicinity of buildings / T. Lawson, D. Penwarden // Proceedings 4th international conference on wind effects on buildings and structures. – 1977. – Т. 4. – С. 605-622.
163. Li F., Zou L., Song J., Liang S., Chen Y. Investigation of the spatial coherence function of wind loads on lattice frame structures (2021) Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 215, art. no. 104675, DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104675.

164. Li, J. Simulation Research on an Airport Terminal Building from the Perspective of Roof Safety under Strong Wind / J. Li, D. Liu // ICCREM. – 2015. – C. 711-717. 10.1061/9780784479377.081.
165. Li, L. Numerical simulation study of the effect of buildings and complex terrain on the low-level winds at an airport in typhoon situation. / L. Li, P. Chan // Meteorologische Zeitschrift. – 2012. – T. 21. – C. 183-192.
166. Li, T. Heating performance of a novel externally-heated geothermal bridge de-icing system: diel tests and numerical simulations. / T. Li, X. Yu, Habibzadeh-Bigdarvish // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2021. – T. 46. – C. 101280.
167. Liang, S. Investigation on wind tunnel tests of a full aeroelastic model of electrical transmission tower-line system / S. Liang, L. Zou, D. Wang [и др.] // Eng. Struct. – 2015. – T. 85. – C. 63-72.
168. Liu, H. Wind Damage to Airport: Lessons Learned. Journal of Aerospace Engineering / H. Liu, F. Nateghi // J. AEROSP. ENG. – 1988. – T. 1.
169. Liu, J. Numerical simulation and test investigation of wind pressures on roof of Jinggangshan airport building. Gongcheng Lixue/ J. Liu, S. Chen S. // Engineering Mechanics. – 2005. - T. 22. – C. 96-100.
170. 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.
171. 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)
172. 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.
173. Loyrette, H. Gustave Eiffel / H. Loyrette. – Rizzoli International Publications, 1985. – 223 c.

174. Ma, T. Extreme wind speed prediction in mountainous area with mixed wind climates / T. Ma, W. Cui, L. Zhao // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. – 2022. – T. 37. – C. 1163-1181.
175. Madeleine, M. Historical Analysis of Hydraulic Bridge Collapses in the Continental United States / M. Madeleine, A. Flint, O. Fringer // *J. Infrastruct. Syst.* – 2017. – T. 23 (3). – C. 1-16.
176. Matejicka, L. A review of ice and snow risk mitigation and control measures for bridge cables / L. Matejicka, C. Georgakis // *Cold Regions Science and Technology*. – 2021. – T. 193. – C. 103429.
177. NEN 8100 (2006), Wind comfort and wind danger in the built environment, NEN 8100:2006. Dutch Standard.
178. O'Rourke, M. Analytical simulation of snow drift loading / O'Rourke, A. DeGaetanob, J. Tokarczyk // *J. Struct. Eng.* – 2005. – T. 131 (4). – C. 660–667.
179. O'Rourke, M. Snow drifting transport rates from water flume simulation / M. O'Rourke, A. DeGaetanob, J. Tokarczyk // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* – 2004. - T. 92. – C. 1245–1264.
180. Patlakas, P. Extreme wind events in a complex maritime environment: Ways of quantification / P. Patlakas, G. Galanis, N. Barranger, G. Kallos // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2016. – T. 149. – C. 89-101.
181. Pezo, M. Determination of the drag coefficient of lattice structures under wind load using porous media approach / M. Pezo, V. Bakić, N. Mirkov // *Thermal Science*. – 2022. – T. 26(1). C. 309-317.
182. Pezo, M. Numerical Determination of Drag Coefficient for Guyed Mast Exposed to Wind Action / M. Pezo, V. Bakić // *Engineering Structures*. – 2014. – T. 62-63. – C. 98-104.
183. 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).

184. Pomelov, V. Experimental studies of wind impact on coke chambers / V. Pomelov, O. Poddaeva, P. Churin // MATEC Web of Conferences. – 2018. – C. 251
185. 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.
186. 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).
187. 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.
188. 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.
189. 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.
190. 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.
191. Poddaeva, O. Experimental modeling of snow action on unique construction facilities / O. Poddaeva // Architecture and Engineering. – 2021. – T. 6(2). – C. 45-51.
192. 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.

193. 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.
194. 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).
195. 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. – T. 317(1).
196. 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. – C. 490 – 497.
197. Poddaeva, O. Numerical simulation of the pedestrian comfort of the microdistrict / O. Poddaeva, P. Churin // Energy Reports. – 2022. – T. 8. – C. 1491-1500.
198. Poddaeva, O. Safety requirements for snow load on unique transport infrastructure facilities / O. Poddaeva // Architecture and Engineering. – 2022. – T. 7(2). – C. 79-85.
199. Poddaeva, O. Stability and reliability of long-span bridge structures / O. Poddaeva, P. Churin, A. Loktev, C. Salame // Architecture and Engineering. – 2022. – T. 7(3). – C. 65-75.
200. 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. – T. 913(4)

201. Poddaeva, O. The study of wind effects on the bridge constructions / O. Poddaeva, A. Fedosova, J. Gribach // E3S Web of Conferences. – 2019. – T. 97.
202. Rizzo, F. Predicting the flutter speed of a pedestrian suspension bridge through examination of laboratory experimental errors / F. Rizzo, L. Caracoglia, S. Montelpare // Eng. Struct. – 2018. – T. 172. – C. 589–613.
203. Salenko, S. Aerodynamic studies of the beam bridge / S. Salenko, A. Obukhovskiy, Y. Gosteev // AIP Conference Proceedings. – 2017. – C. 1893
204. Santo, H. Current blockage in sheared flow: experiments and numerical modelling of regular waves and strongly sheared current through a space-frame structure / H. Santo, D. Stagonas, E. Buldakov, P. Taylor // J. Fluid Struct. – 2017. – T. 70. – C. 374-389.
205. Sato, Aerodynamic characteristics of super long-span bridges with slotted box girder / H. Sato, S. Kusuhara // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 2000. – T. 88 (2–3) – C. 297-306.
206. Scheer, J. Failed bridges: case studies, causes and consequences / J. Scheer. – Berlin: Ernst & Sohn, 2010. - 321 c.
207. Starossek, U. Flutter analysis methods for bridges stabilized with eccentric wings / U. Starossek, R. Starossek // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2021. – T. 219.
208. Strogatz, S. Crowd synchrony on the Millennium Bridge / S. Strogatz, D. Abrams, A. McRobie, B. Eckhardt, E. Ott // Nature. – 2005. – T. 438. – C. 43–44.
209. Taylor, Z. Aerodynamics of Long-Span Bridges: Susceptibility to Snow and Ice Accretion / Taylor Z. [и др.] // Journal of Structural Engineering. – 2017. – T. 143. – C. 04017039.
210. The use of Wind tunnel experiments for wind loads on structures. C.P.W. Geurts TNO Built Environment and Geosciences, Delft, The Netherlands.
211. Theodorsen, T. General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter / T. Theodorsen. - Tech. Rep. 496, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), Washington, DC, USA, 1935.

212. Tse, K. Numerical simulation of wind loading on roadside noise mitigation structures / K. Tse, Y. Yi, K. Shum // *Wind and Structures*. – 2013. – T. 17, № 3. – C. 299-315.
213. Tsuyoshi, S. Public Square Design with Snow and Wind Simulations Using Wind Tunnel / S. Tsuyoshi // *Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research*. – 2011.
214. UK National Annex to Eurocode 1 - Actions on structures Part 1-4: General actions - Wind actions.
215. Wang, S. Unified numerical model of wind-induced response of long-span structures: Aerostatic torsional divergence, flutter, and random buffeting / S. Wang, W. Zhang, Y. Tian, C. Bao, Z. Chen // *Structures*. – 2022. – T. 45. – C. 1076-1094.
216. Wu, D. Wind Loading and Wind Effects on the Roof of Harbin West Railway Station / D. Wu, Y. Sun, Y. Wu // *Advanced Materials Research*. – 2010. – T. 163-167. – C. 4280-4285.
217. Yan, L. Wind tunnel measurement of overall and sectional drag coefficients for a super high-rise steel tube transmission tower / L. Yan, L. Zhengliang, S. Eric [и др.] // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2020. – T. 206. – C. 104363.
218. Yang, F. Experimental Study on Drag Coefficients and Shielding Effects of Steel Tubular Members in Lattice Transmission Towers / F. Yang, H. Niu // *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*. – 2021. – T. 41 (10). – C. 3632 – 3644.
219. Zhang, G. Experimental Investigation of Snow Accumulations on Two-Span Single-Pitched Roofs Based on a New Similarity Criterion / G. Zhang, Q. Zhang, H. Mo // *Frontiers in Earth Science*. – 2022. – T. 10. – C. 785010.
220. Zhang, Q. Experimental Study of Interference Effects of a High-Rise Building on the Snow Load on a Low-Rise Building with a Flat Roof / Q. Zhang, Y. Zhang, Z. Yin [и др.] // *Applied Sciences*. – 2021. – T. 11. – C. 11163.

221. Zhang, T. Flutter reliability analysis of Xiangshan harbor highway cable-stayed bridges in service / T. Zhang, X. Cui, X. Zhang [и др.] // Applied Sciences (Switzerland). – 2022. – Т. 12(16).
222. Zhou, X. Study on snow loads on roof of terminal 3 of Beijing capital international airport. Tongji Daxue Xuebao / X. Zhou, M. Gu, Z. Zhu, K. Huang // Journal of Tongji University. – 2007. – Т. 35. – С. 1193-1196.
223. Zhao, L. Wind Tunnel Test of Wind Load on a Typical Cross Line High-Speed Railway Station / L. Zhao, Z.-X. Yu, Qi Xin, Xu Hu // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2021. – Т. 25. – С. 1-9.
224. Zhou, X. CFD simulation of snow redistribution on a bridge deck: Effect of barriers with different porosities / X. Zhou, T. Zhang, W. Ma // Cold Regions Science and Technology. – 2021. – Т. 181. – С. 103174.
225. Zhou, X. Simulation of Snow Drifting on Roof Surface of Terminal Building of an Airport / X. Zhou, X. LI // Disaster Advances. – 2010. – Т. 3. – С. 42-50.
226. Zhou, X. Wind Tunnel Test of Snow Loads on a Stepped Flat Roof Using Different Granular Materials / X. Zhou, J. Hu, M. Gu // Nat. Hazards. – 2014. – Т. 74 (3). – С. 1629–1648.
227. Zhou, X. Wind Tunnel Test of Snow Redistribution on Flat Roofs / X. Zhou, L. Kang, X. Yuan, M. Gu // Cold Regions Sci. Technology. – 2016. – Т. 127. – С. 49–56.