

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт
институт

Кафедра строительных конструкций и управляемых систем
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ С.В. Деордиев
подпись
« _____ » _____ 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Расчет напряженно-деформируемого состояния светопрозрачного козырька
на примере международного аэропорта Красноярск»
тема

08.04.01 «Строительство»
код и наименование направления

08.04.01.14 «Промышленное и гражданское строительство»
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель _____ доцент, к.т.н. И.Н.Архипов
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Выпускник _____ С.М.Масловский
подпись, дата инициалы, фамилия

Рецензент _____ доцент, к.т.н. Р.А.Сабиров
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Красноярск 2021

АННОТАЦИЯ

Актуальность исследования:

- 1) Разработка решений по повышению эффективности работы вантовых светопрозрачных конструкций;
- 2) Анализ работы эксплуатируемой вантовой светопрозрачной конструкции пиковое ветровое возбуждение;
- 3) Анализ вариантов закрепления стеклянных конструкций, работающих в непосредственной близости с металлическими конструкциями.

Объект исследования: вантовый светопрозрачный козырек в аэропорту Красноярск.

Гипотеза исследования: эксплуатируемая вантовая конструкция не работает эффективно и требуется рациональный перерасчет конструкции.

Цель диссертационной работы: создание оптимальной, металлоемкой и эффективной вантовой конструкции светопрозрачного навеса при действии ветровой нагрузки.

Для достижения цели исследования и проверки гипотезы были поставлены следующие задачи:

- 1 Изучить и проанализировать работу и расчеты вант, вантовых козырьков согласно действующим нормативным документам;
- 2 Изучить действие ветровой нагрузки для протяженных в длину навесов согласно действующим нормам проектирования;
- 3 Выполнить статический расчет конструкции в программных комплексах SCAD Office, Лира 10, Autodesk Robot Structure, сравнить и проанализировать полученные результаты и сделать вывод об эффективности вида закрепления вант;
- 4 Исследовать напряженно-деформированное состояние фрагмента конструкции при помощи программного комплекса Ansys с целью определения эффективности работы и целесообразности ныне

зaproектируемой и эксплуатируемой конструкции. а также выполнить конструктивный расчет.

В процессе решения поставленных задач были сделаны следующие основные выводы:

1 Учёт ветровой нагрузки на сооружения является очень важным фактором, который стоит учитывать на всех стадиях проектирования и строительства зданий и сооружений.

2 Нормативные документы обязуют выполнять расчеты конструкций на пиковую составляющую ветровую нагрузку при проектирование навесов, что не наблюдается в действующих проектах, прошедших экспертное заключение.

3 При требуемом загружении пиковой ветровой нагрузке и при задании его направления снизу согласно [СП20, приложения В, рисунок. В12] на консольных узлах вантовой конструкции возникают сжимающие усилия, что недопустимо при работе абсолютно-упругих вант, запроектированных и эксплуатируемых в виде стального тросевидного каната.

Ключевые слова: напряженно-деформируемое состояние, вантовая конструкция, навес, численные методы расчета, пиковая ветровая нагрузка.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 1. Проектирование светопрозрачных вантовых конструкций.....	9
1.1 История развития вантовых конструкций и их примеры	9
1.2 Методики расчета вантовых конструкций, применяемых в современном строительстве.....	18
1.2.1 Ручной способ решения задачи	18
1.2.2 Способ решения с помощью расчетного комплекса «Лира»	28
1.3 Выводы по главе 1.....	30
Глава 2. Пульсационная составляющая ветровой нагрузки, как необходимый параметр задания ветровой нагрузки	31
2.1 Общие сведения о ветровой нагрузке	31
2.2 Действие ветра на сооружение	33
2.3 Принципы расчета ветровой нагрузки согласно действующим нормативным документам.....	40
2.3.1 Схемы задания ветровой нагрузки на расчетную схему навеса	43
2.4 Выводы по главе 2.....	45
Глава 3 Статический расчет светопрозрачного вантового козырька	46
3.1 Исходные данные	46
3.2 Описание конструкции	47
3.3 Цель расчета.....	50
3.4 Сбор нагрузок	51
3.4.1 Нагрузка от собственного веса	51
3.4.2 Снеговая нагрузка	52
3.4.3 Основная ветровая нагрузка	54

3.4.4 Пиковая ветровая нагрузка	62
3.4.5 Расчетные сочетания усилий	64
3.4 Расчетная модель вантовой светопрозрачной конструкции в программных комплексах	66
3.4.1 Статический расчет.....	68
3.5 Анализ результатов, по полученным перемещениям и усилиям в конструкции.....	74
3.6 Вывод по главе 3	75
Глава 4 Конструктивный расчет.....	77
4.1 Исследование и анализ использование конструкций на действие статического ветрового нагружения при помощи ANSYS.....	77
4.2 Анализ полученных данных.....	78
4.3 Конструктивный анализ использования уже введенных в эксплуатацию конструкций и анализ целесообразности их использования	78
4.4 Вывод на главе 4.....	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	81
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	84

ВВЕДЕНИЕ

В современном строительстве на протяжении нескольких последних десятилетий отражается отчетливый тренд к увеличению площадей остекления здания. Это связано главным образом с архитектурной выразительностью стеклянных конструкций.

Сопутно с ростом применения стекла расширяется применение светопрозрачных конструкций (СПК). Основа СПК это также металлоконструкции, доля которых на рынке растет с каждым годом. Применение стекла на входных группах отразилось и на конструкциях, поддерживающих их.

Такими конструкциями в последнее время становятся ванты. Особенность их применения связано с несколькими ключевыми в строительстве позициями. Эти позиции всем известны: облик, надежность и экономия. Именно ванты подразумевают под своим значением при правильном их использовании эти три основные правила.

Не секретом будет и доложить их вам: эффективная работа при растяжении, экономическая целесообразность и архитектурная выразительность.

На основе ранее сказанных мною слов и выбранной в процессе разработки темы эксплуатируемой конструкции стало интересна работа конструкции при ветровом нагружении. Как поведут себя ванты при пиковом ветровом загружении, расчет которого требуют нормативные документы?

Актуальность исследования:

- 1) Разработка решений по повышению эффективности работы вантовых светопрозрачных конструкций;
- 2) Анализ работы эксплуатируемой вантовой светопрозрачной конструкции на пиковое ветровое возбуждение;
- 3) Анализ вариантов закрепления стеклянных конструкций, работающих в непосредственной близости с металлическими конструкциями.

Степень научной разработанности темы. Теоретические и методологические основы расчета вантовых конструкций присущи в работах, как ведущих зарубежных, так и отечественных ученых, таких как:

В.Г. Шухов, Н.В. Кирсанов, Н.П. Абовский, С.Н. Кривошапко, Н.Е Фульмес, Д.А Кульбицкая, В.В Егоров, Е.Н Алексашкин, М.Н. Сатторов, П.А. Сайфуллоев, А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров, В.И Шумейко, А.А Карамышева, О.А Кудинов

Расчетом висячих и вантовых конструкций занимались многие ученые деятели, среди которых: А.Навье, Д. Мелан, Н.Н. Стрелецкий, Г.П. Передерий, И.М. Рабинович, Е.Ю. Агеева, А.И. Спиридонова, С.Н. Кривошапко, Д.Б. Кисилев и многие другие.

Идея управления напряженно-деформируемым состоянием (НДС) вантовых структур нашла свое применение при строительстве мостов автомобильного, пешеходного путей, а также в работах: Н.П. Абовского, С.Н. Кривошапко, В.Н. Голосова, Д. Харриса, Л. Клойбера, Д. Мейера.

Объект исследования: вантовый светопрозрачный козырек в аэропорту Красноярск.

Предмет исследования: программные расчеты комплексы, своды правил.

Гипотеза исследования: эксплуатируемая вантовая конструкция не работает эффективно и требуется рациональный перерасчет конструкции.

Цель диссертационной работы: создание оптимальной, металлоемкой и эффективной вантовой конструкции светопрозрачного навеса при действии ветровой нагрузки.

Для достижения цели исследования и проверки гипотезы были поставлены следующие задачи:

1 Изучить и проанализировать работу и расчеты вант, вантовых козырьков согласно действующим нормативным документам;

2 Изучить действие ветровой нагрузки для протяженных в длину навесов согласно действующим нормам проектирования;

3 Выполнить статический расчет конструкции в программных комплексах SCAD Office, Лира 10, Autodesk Robot Structure, сравнить и проанализировать полученные результаты и сделать вывод об эффективности вида закрепления вант;

4 Исследовать напряженно-деформированное состояние фрагмента конструкции при помощи программного комплекса Ansys с целью определения эффективности работы и целесообразности ныне запроектируемой и эксплуатируемой конструкции. а также выполнить конструктивный расчет.

Научная новизна работы: результаты численных исследований по расчету НДС вантового светопрозрачного козырька на действие пиковой ветровой нагрузки.

Практическая значимость: выполненные автором исследования могут быть использованы при проектировании и реконструкции навесов, козырьков.

Достоверность научных положений, результатов и выводов, содержащихся в работе, основывается на: корректном использовании уравнений механики деформированного твердого тела и основных положений теории и методов расчета НДС конструкций.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: Проспект Свободный» СФУ (г. Красноярск, 2020г.).

Публикации. Отдельные результаты исследования уже опубликованы в статье «Управление вантовой конструкцией светопрозрачного навеса на примере международного аэропорта Красноярск — Емельяново» размещенной в сборнике №43 журнала «Молодой ученый»

Глава 1. Проектирование светопрозрачных вантовых конструкций

1.1 История развития вантовых конструкций и их примеры

Теория статического расчета висячих систем, основание которой положили работы Навье в 1825 году, развивается уже второе столетие, но проблема не потеряла своего значения и в настоящее время. Это связано, прежде всего, со значительным увеличением пролетов и нагрузок строящихся висячих сооружений, а также появлением новых сверхпрочных материалов, используемых для основных конструктивных элементов (прежде всего кабеля или троса), совершенствованием математических методов и вычислительной техники, что позволяет решать новые задачи при проектировании висячих систем и подсистем.

В висячих конструкциях внешнюю нагрузку воспринимают растянутые элементы: стальные канаты, кабели, цепи, прокатный металл и листовые мембранны, работающие только на растяжение. В висячих вантовых системах ванты, иными словами нити, или тросовые плоские, или пространственные фермы поддерживают жесткие элементы, такие как: балки, плиты, арки, рамы, работающие на изгиб, в проектном положении, а уже на эти жесткие элементы, в свою очередь, укладываются ограждающие конструкции. К вантовым структурам, помимо висячих вантовых систем, относятся также конструкции, в которых ванты являются стабилизирующими элементами или участвуют в создании геометрического образа сооружения. Простейшей вантовой структурой можно было бы считать идеальную нить, т.е. нить, которая не оказывает сопротивления изгибу и кручению. Однако у архитекторов существует мнение, что оставаясь всегда и только всегда прямолинейными, ванты не принадлежат к семейству гибких нитей.

Учитывая, что ванты – это открытые тросы, в зависимости от их конструктивных особенностей и назначения следует предложить следующую классификацию вантовых структур:

- висячие вантовые структуры, поддерживающие в отдельных точках тентовые покрытия;
- вантовые стабилизирующие упругие растяжки для контурных опорных элементов тентовых покрытий;
- подвесные либо висячие вантовые покрытия с одной несущей стойкой или пилоном;
- подвесные вантово-стержневые покрытия с несущими стойками в один или несколько рядов,
- висячие вантово-арочные (арочно-вантовые) покрытия,
- консольные вантовые системы,
- вантовые конструкции башенного типа в форме однополостного гиперболоида, с вантами, совпадающими с прямыми образующими однополостного гиперболоида,
- тросовые оттяжки высоких мачт,
- висячие мосты.

Как видно из классификации висячие тросовые конструкции и покрытия сооружений, в рассматриваемую группу сооружений не включены, хотя вместе с мембранными покрытиями они составляют более широкий класс висячих конструкций. Выдающийся научный деятель В.В. Ермолов привел в табличной форме основные схемы установки стоек и расположения вант в подвесных вантово-стержневых и висячих вантово-арочных покрытиях. Эта табличная форма приведена на рисунке 1.1.

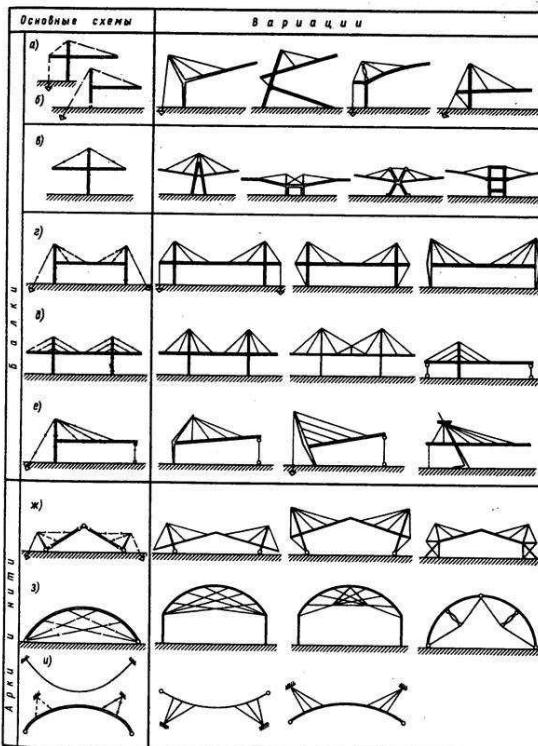


Рисунок 1.1 – Схемы установки стоек и расположения вант в подвесных вантово-стержневых и висячих вантово-арочных покрытиях

Рассмотрим типы вантовых структур:

1 Висячие вантовые структуры, поддерживающие в отдельных точках тентового покрытия.

Например, для иллюстрации сооружений этого типа можно привести куполообразную крышу Национального теннисного центра в Лондоне, Великобритания. Покрытие перекрывает около 11500 м² плана. Под ним расположены следующие объемные структуры различного назначения: 6 кортов для игры в теннис, специализированная гимназия, спортивная клиника, помещения для тренеров и т.д. Одна из объемных структур перекрыта тентовой конструкцией, которая поддерживается системой вант с двумя трубчатыми опорами. Изображение вида конструкции отображено на рисунке 1.2.

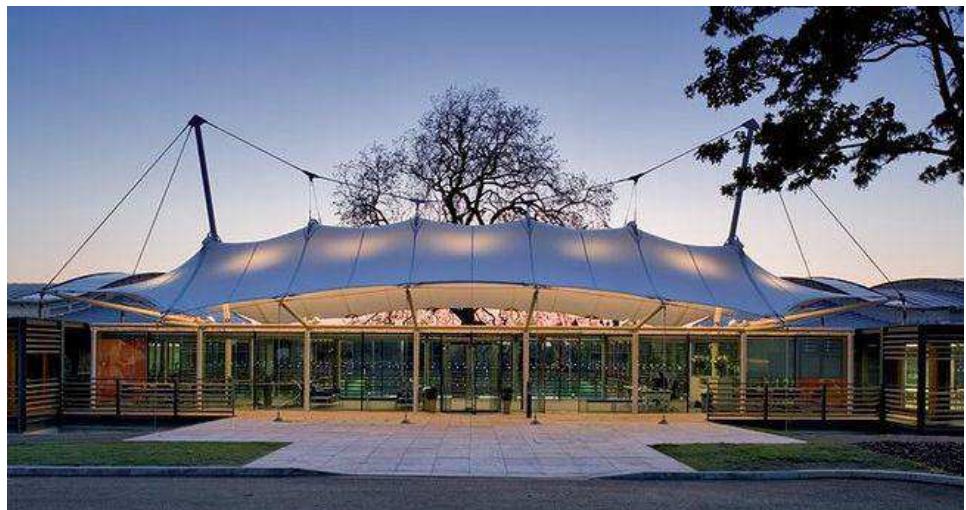


Рисунок 1.2 – Национальный теннисный центр в Лондоне

2 Вантовые стабилизирующие упругие растяжки для контурных опорных элементов тентовых покрытий.

Данный вид вантовых конструкций являются комбинированной структурой, которая включает в себя висячее тросовое покрытие, и имеет в своем составе несколько вант, которые являются стабилизирующими. Общий вид такой комбинированной конструкции представлен на рисунке 1.3. Конструкции такого типа могут быть причислены, как к тросовым висячим структурам, так и к висячим вантовым структурам. При конструировании сооружений этого типа особо внимание необходимо уделить анкерам устройствам, служащим для передачи усилий от основной конструкции на грунтовую основу. Связано это с тем, что посредством действия ветра на подобную конструкцию возникает усилие со стороны грунтовой основы. Поэтому эти анкера должны иметь достаточную большую прочность на вырыв.



Рисунок 1.3 – Тросово-вантовая структура

3 Подвесные либо висячие вантовые покрытия с одной несущей стойкой или пylonом.

Ярким примером такого типа служит крытый конькобежный центр «Крылатское» (ледовый дворец в Крылатском), изображенный на рисунке 1.4 - крупнейшее в Европе сооружение этого типа, которое было открыто еще в 2006 году. Здесь покрытие с помощью вант подвешено к одной Л-образной опоре, установленной на осисимметрии сооружения со смещением вдоль этой же оси. Две упругие оттяжки опоры обеспечивают равновесие всей вантовой системы, в свою роду служащие «якорями конструкции».

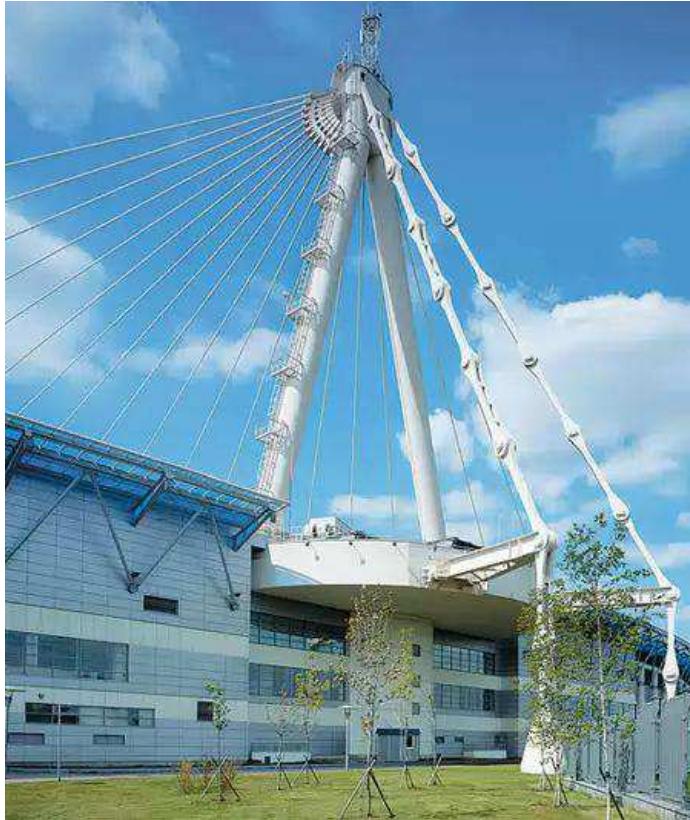


Рисунок 1.4 - Ледовый дворец в Крылатском, Москва

4 Подвесные вантово-стержневые покрытия с несущими стойками в один или несколько рядов.

Этот тип вантовых покрытий считается наиболее простым и распространенным, часто эти покрытия называют вантово-балочным. В связи с тем, что балка жесткости поддерживается вантами в одной или нескольких точках. Ванты закрепляются на стойках, которые расчленены в поперечном и продольном направлении. Павильон Великобритании на ЭКСПО-70 в Осаке представляет собой однорядную систему из 4-х стальных рам высотой 34 м, к которым с помощью вант подвешена несущая конструкция крыши и примыкающую к ней стеновое ограждение. Павильон с несущим вантовым покрытием изображен на рисунке 1.5).



Рисунок 1.5 - Павильон Великобритании на ЭКСПО-70 в Осаке, Япония

5 Висячие вантово-арочные (арочно-вантовые) покрытия.

Возможности вантовых структур сложно оценить и раскрыть их потенциал. Но так или иначе знаменитым архитекторам Норману Фостеру и Сантьяге Калатрава удалось их использовать со всей своей красоты и эффективности. На рисунке 1.6 изображен стадион «Уэмбли», запроектированный Норманом Фостером.



Рисунок 1.6 - Стадион «Уэмбли», висячевантовое покрытие, Лондон

На рисунке 1.7 изображен стадион «Спирос Луис», запроектированный Сантьяге Калатрава.



Рисунок 1.7 - Стадион «Спирос Луис», висячее вантовое покрытие, Афины

Их сооружения представляют собой отдельную группу висячих покрытий, иначе, пилонные арочно-вантовые покрытия. Так называют висячую систему, которая поддерживается вантами, подвешенными к системе пилонов – арок. При этом как пилоны, так и ванты, поддерживающие покрытие, расположены выше него, т. е. на ванты не укладываются ограждающие элементы покрытия, но оно его удерживает.

Стадион «Уэмбли» (Wembley Stadium) – самая длинная однопролетная арочно-вантовая структура в мире. Несущая арка держит край северной секции крыши стадиона. Всего лишь за 15 минут можно полностью открыть стадион, просто убирая подвижные панели в южную неподвижную секцию крыши.

6 Консольно-вантовые системы.

Консольно-вантовые системы представляют собой простую схему: балки жесткости, поддерживаемые за один конец вантами, а другим концом опирающиеся непосредственно на сооружение. Простейшим примером такой одноконсольной системы является вантовый консольный козырек, который крепится к несущей стене с помощью специальных растяжек в виде вант, которая может быть в виде тяги, растяжки. Тяги могут изготавливаться из прутков, труб или тросов. Козырьки консольно-вантового типа по желанию архитектора могут иметь большую зону покрытия, так как второй конец конструкции поддерживается вантами, через которую нагрузка от козырька передается опять же на основное сооружение, туже несущую стену или колонну. На рисунке 1.8 изображен козырек консольно-вантового типа длиной 6,5 м.



Рисунок 1.8 – Козырек консольно-вантового типа длиной 6,5 м

1.2 Методики расчета вантовых конструкций, применяемых в современном строительстве

1.2.1 Ручной способ решения задачи

Основным элементом вантовых систем является «гибкая» (в отдельных редких случаях «жесткая») нить. Для ручного расчета простейших вантовых конструкций на прямоугольном или же на круглом планах во многих случаях достаточно рассмотреть отдельные ванты с приходящейся на них нагрузкой.

Начальную форму нити целесообразно выбирать подобной веревочной кривой от преобладающей нагрузки на покрытие. Такими нагрузками в большинстве своем являются равномерно распределенные нагрузки от собственного веса конструкции. Если в дальнейшем на ванты будет приложена также равномерно распределенная временная нагрузка, то она будет равновесной по отношению к выбранной форме нити, а деформации ванты будут связаны лишь с ее упругими удлинениями. Если же первоначальная форма не отвечает по своим параметрам форме равновесия от основных нагрузок, то ванты будут испытывать большие прогибы. При этом пользоваться приближенными уравнениями равновесия нельзя, поскольку они основываются на относительной малости горизонтальных смещений точек ванты.

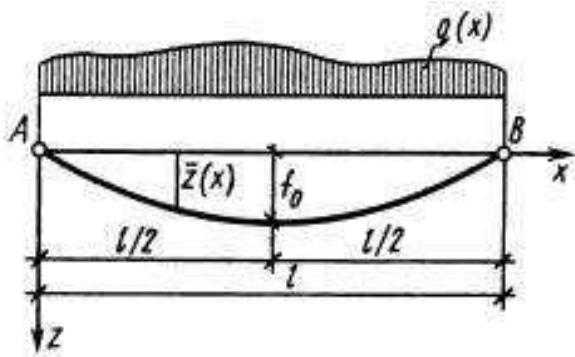


Рисунок 1.9 – Расчетная схема ванты с опорами на одном уровне

Ванты имеют две основные отправные характеристики – форма и первоначальная длина. При этом для расчета чаще всего задаются значением стрелы провисания ванты – наибольшей по величине ординаты нити. На рисунке 1.9 изображена расчетная схема ванты с опорами на одном уровне, на котором и изображена стрела провисания ванты. Величина стрелки в значительной степени влияет на экономичность вантовых покрытий. Существует правило: чем больше стрелка, тем меньше усилия в элементах конструкции. Однако при этом увеличивается строительная высота покрытия и к тому же возрастают деформативность вант при неравновесных нагрузках. Оптимальное соотношение стрелки к пролету находится в пределах 1/10...1/25.

Задавшись величиной стрелки, находят первоначальную форму веревочной кривой из уравнения

$$z_x = \frac{M_x}{H}, \quad (1.1)$$

где z_x – ординаты нити в исходном состоянии, т.е без нагрузки;

M_x – «балочный» момент;

$H = M_{max}/f_0$ – распор в ванте, т.е горизонтальная составляющая опорной реакции;

M_{max} – максимальный «балочный» момент;

f_0 – стрелка ванты в месте наибольшего «балочного» момента.

Зная уравнение кривой нити, можно вычислить ее длину L по приближенной формуле

$$L \int_0^1 \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} dx = l + \frac{1}{2} \int_0^1 \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2} dx, \quad (1.2)$$

Так, например, для ванты, очерченной по квадратной параболе, т.е форме, приобретаемой под равномерно распределенной нагрузкой, с опорами, лежащими на одном уровне, как, например, изображено на рисунке 1.9 ее длина будет рассчитываться по следующей формуле

$$L = l + \frac{8}{3} \cdot \frac{f^2}{l}, \quad (1.3)$$

где l – пролет ванты;

f – то же что в формуле (1.1).

В дальнейших расчетах используется коэффициент A , равный удвоенной разности длины нити и ее пролета, находящийся по формуле

$$A = 2(L - l), \quad (1.4)$$

Для наиболее характерных видов загружения значения A изображены на рисунке 1.10

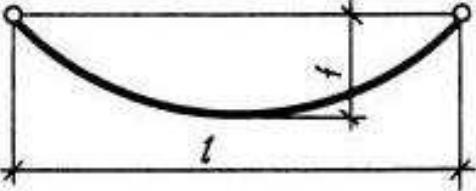
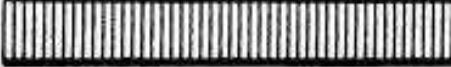
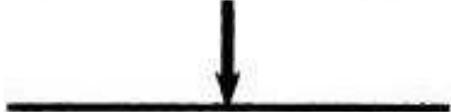
Характер нагрузки	Значение А
	-
	$5,3 \frac{f^2}{l}$
	$5,4 \frac{f^2}{l}$
	$7,2 \frac{f^2}{l}$
	$4,8 \frac{f^2}{l}$
	$4,0 \frac{f^2}{l}$

Рисунок 1.10 – Значение коэффициента А в зависимости от вида загружения

Для вант с опорами, лежащими на разных уровнях формула следующая

$$z_x = \frac{M_x}{H} + xt \operatorname{tg} \beta, \quad (1.5)$$

где z_x – то же что в формуле (1.1);

M_x – «балочный» момент;

$H = M_c/f_c$ – то же что в формуле (1.1);

f_c – ордината точки «С», которая задается

На рисунке 1.11 изображена расчетная схема ванты с опорами на разных уровнях при действии равномерной распределенной нагрузки

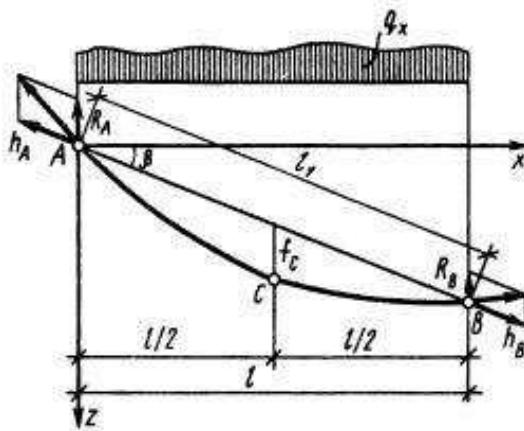


Рисунок 1.11 – Расчетная схема ванты с опорами на разных уровнях при действии равномерной распределенной нагрузки

Для описания распора вант с опорами на разных уровнях используют следующее уравнение

$$H^3 \cdot \frac{l}{R} + \frac{1}{2} \cdot A \cdot H^2 = \frac{1}{2} \cdot D, \quad (1.6)$$

где $H = M_c/f_c$ – то же что в формуле (1.1);

l – пролет;

R – жесткость нити на растяжение;

A – то же что в формуле (1.4);

$D = f Q_x dx$ – функция описывающая перерезывающую силу в ванте;

Q_x – балочная перерезывающая сила.

Для предварительной оценки усилия нить можно принять нерастяжимой, тогда усилие H будет находиться по формуле

$$H = \sqrt{D/A}, \quad (1.7)$$

где A – то же что в формуле (1.4);

D – то же что в формуле (1.6);

Значения D для наиболее характерных видов загружения отображены на рисунке 1.12

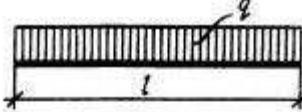
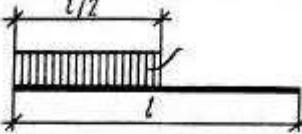
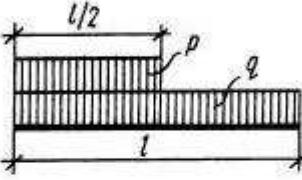
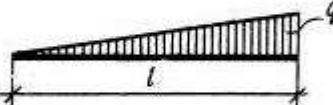
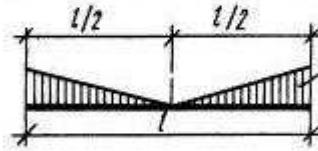
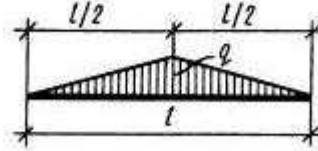
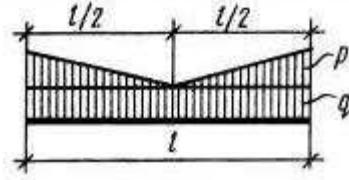
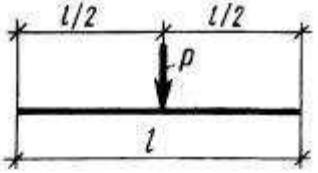
Схема загружения	Значение D
	$\frac{q^2 l^2}{12}$
	$\frac{5p^2 l^3}{192}$
	$\frac{q^2 l^3}{12} \left(1 + \gamma^* + \frac{5}{16}\gamma^2\right)$
	$\frac{q^2 l^3}{45}$
	$\frac{q^2 l^3}{80}$
	$\frac{q^2 l^3}{30}$
	$\frac{q^2 l^3}{12} + \frac{qp l^3}{16} + \frac{p^2 l^3}{80}$

Схема загружения	Значение D
	$\frac{p^2 l}{4}$

$$*\gamma = p/q.$$

Рисунок 1.12 – Значение характеристики D в зависимости от вида загружения

Частным случаем провисающей гибкой нити является случай, когда $L = 1$, т. е. $A = 0$ (нить-струна).

Тогда распор будет находиться из формулы

$$H = \sqrt[3]{DR/(2l)}, \quad (1.8)$$

где D – то же что в формуле (1.6);

R – то же что в формуле (1.6).

Если L меньше 1, т. е. первоначальная заготовка ванты получается короче пролета, тогда усилие в струне находится из уравнения

$$H^3 - \frac{1}{2} \cdot A \cdot \frac{R}{l} \cdot H^2 = \frac{R}{2 \cdot l} \cdot D, \quad (1.9)$$

где H – то же что в формуле (1.1);

l – то же что в формуле (1.6);

R – то же что в формуле (1.6);

A – то же что в формуле (1.4);

D – то же что в формуле (1.6).

Если опоры нити располагаются на разных уровнях, как на рисунке 1.11, то усилие распора находится из уравнения

$$H^3 \cdot \frac{l_1}{R} + \frac{1}{2} \cdot A_1 \cdot H^2 = \frac{1}{2} \cdot D, \quad (1.10)$$

где H – то же что в формуле (1.1);
 R – то же что в формуле (1.6);
 D – то же что в формуле (1.6);
 l_1 – длина прямой, соединяющей точки опоры;
 $A_1 = 2(\frac{l_1}{l})^3 \cdot (L - l_1)$ – коэффициент длины
 L – длина нити.

В расчетах при податливых опорах усилие в ванте находится из уравнения

$$H^3 = \left[\frac{l}{R} + (\rho_1 + \rho_2) \right] + \frac{1}{2} \cdot A \cdot H^2 = \frac{1}{2} \cdot D, \quad (1.11)$$

где H – то же что в формуле (1.1);
 R – то же что в формуле (1.6);
 D – то же что в формуле (1.6);
 l – то же что в формуле (1.6);
 A – то же что в формуле (1.4);
 ρ_1, ρ_2 – податливость опор, (ед.длины/ед. силы).

В случае изменения длины ванты от перепада температуры уравнение будет иметь вид

$$H^3 \cdot \frac{l}{R} + \left(\frac{A}{2} + \Delta_t \right) \cdot H^2 = \frac{1}{2} \cdot D, \quad (1.12)$$

где H – то же что в формуле (1.1);
 R – то же что в формуле (1.6);
 D – то же что в формуле (1.6);
 l – то же что в формуле (1.6);
 A – то же что в формуле (1.4);
 Δ_t – удлинение нити от температурного перепада.

Соответственно при податливых опорах, лежащих на разном уровне уравнение следующее

$$H^3 = \left[\frac{l_1}{R} + (\rho_1 + \rho_2) \right] + \frac{1}{2} \cdot A_1 \cdot H^2 = \frac{1}{2} \cdot D, \quad (1.13)$$

где H – то же что в формуле (1.1);
 R – то же что в формуле (1.6);
 D – то же что в формуле (1.6);
 l_1 – то же что в формуле (1.10);
 A_1 – то же что в формуле (1.10);
 ρ_1, ρ_2 – то же что в формуле (1.11).

И разумеется при изменении длины ванты от перепада температуры, лежащей на разном уровне уравнение следующее

$$H^3 \cdot \frac{l_1}{R} + \left(\frac{A_1}{2} + \Delta_t \right) \cdot H^2 = \frac{1}{2} \cdot D, \quad (1.12)$$

где H – то же что в формуле (1.1);
 R – то же что в формуле (1.6);
 D – то же что в формуле (1.6);
 l_1 – то же что в формуле (1.10);

A_1 – то же что в формуле (1.10);

Δ_t – то же что в формуле (1.12).

«Жесткие» ванты имеют особенность, они работают как на растяжение, так и на изгиб. Т.е чем значительнее жесткость вант, тем больше в них доля изгибных напряжений. Деформативное состояние жесткой нити описывается дифференциальным уравнением

$$EIw'' - H(z + w) + M_x = 0, \quad (1.13)$$

где EI – изгибная жесткость ванты;

w – прогиб;

H – распор в нити;

z – ординаты «жесткой» нити в первоначальном состоянии

M_x – то же что в формуле (1.5).

Решение такого уравнения достаточно затруднительно, так как в нем присутствуют две неизвестные прогиб и распор.

Момент от равновесной нагрузки, действующий в ванте, путем преобразования (2.11.17) можно найти из выражения

$$M_B = \frac{3}{16} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\Delta l}{\Delta L}\right) \cdot l}{EI} \cdot \left(1 - \frac{ch K_x}{\frac{ch K l}{2}}\right) \cdot M_x, \quad (1.14)$$

где M_x – то же что в формуле (1.5);

$K = H/(EI)$; – коэффициент;

H – то же что в формуле (1.13);

EI – то же что в формуле (1.13);

M_x – то же что в формуле (1.5);

l – то же что в формуле (1.6).

В вышерассмотренном случае распор в ванте определяется, как в гибкой нити.

1.2.2 Способ решения с помощью расчетного комплекса «Лира»

Для отображения хода работы приведем пример согласно [15]

Вант с изогнутой осью (трос) можно рассчитать в геометрически нелинейной постановке с использованием специализированных программных комплексов ЛИРА.

Исходная задача:

Пусть на вант по всей длине действует равномерно – распределенная постоянная нагрузка q ($\text{Н}/\text{м}$) и временная нагрузка p . Расчетная схема ванта с отображением нагружения изображена на рисунке 1.13.

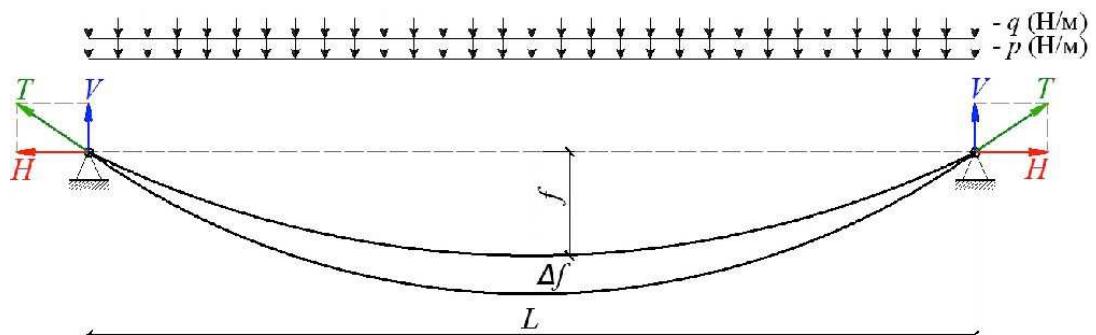


Рисунок 1.13 – Расчетная схема ванта – модель «изогнутая линия»

L – пролет, м; f – провисание (стрела провеса), м; Δf – прогиб (перемещение) ванта, м; q – равномерно-распределенная нагрузка, $\text{Н}/\text{м}$; V – вертикальная составляющая опорной реакции, Н ; T – сила натяжения (опорная сила), Н ; H – горизонтальная составляющая опорной реакции, Н

Пролет ванта между неподатливыми краевыми шарнирными опорами составляет $L = 30,0$ (м), диаметр $\varnothing 0,017$ (м).

Вант изготовлен из стали и представляет собой канат одинарной свивки типа ТК согласно ГОСТ 3064 с провисанием (стрелой провеса) $f = 3,5$ (м).

Интенсивность равномерно – распределенной нагрузки по всей длине ванта с учетом собственного веса самого ванта составляет $q=10000$ (Н/м).

Изгибная жесткость ванта $EA = 28628200$ (Н), собственный вес ванта – $m = 131,96$ (Н/м), начальный модуль продольной упругости $E = 1,70293 \cdot 10^{11}$ (Н/м²) согласно [16 табл. Г.10].

Коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$ [16 табл. Г.10].

Результаты расчета шарнирно-опертого ванта с применением ПК ЛИРА по расчетной схеме (модели) «изогнутая линия» представлены на рисунках 1.14-1.15, на которых отображены перемещения вдоль осей приложения нагрузки.

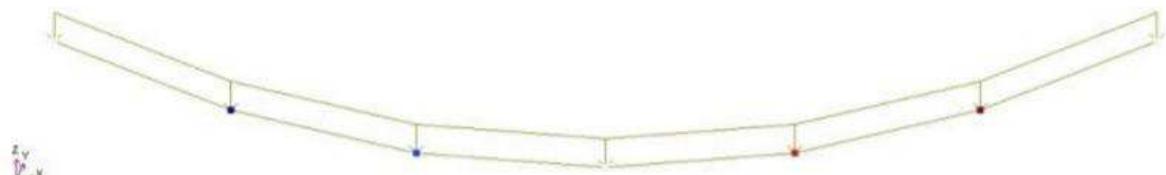
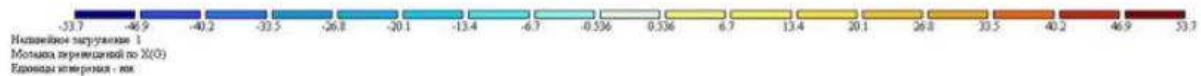


Рисунок 1.14 - Перемещение ванта по оси X составило 0,0537 (м)



Рисунок 1.15 - Перемещение ванта по оси Z составила в центральном узле 0,528 (м)

1.3 Выводы по главе 1

Согласно проделанной работе по главе 1 сделаем выводы:

1 Как и в российском, так и в зарубежном опыте достаточно активно используются вантовые конструкции в связи:

- с их конструктивной эффективностью;
- архитектурной выразительностью;
- экономической целесообразностью.

2 Методов решения вантовых конструкций, а также в частности самих вант, существует несколько. Это зависит от подхода к решению задачи. Результаты ручного решения отличаются от машинного исчисления в связи с разбивкой элементарной модели на наиболее мелкие конечные элементы.

Глава 2. Пульсационная составляющая ветровой нагрузки, как необходимый параметр задания ветровой нагрузки

2.1 Общие сведения о ветровой нагрузке

Ветер в глазах строителя – это кратковременная нагрузка источник вибрации конструкций. Для зданий, большепролетных конструкций, мостов или других инженерных сооружений верное и ясное представление о структуре ветра, законах распространения, его интенсивности, частоте сильных и величины порывов является обязательным условием проектирования, поскольку действие ветра, наряду со всеми другими нагрузками, определяет прочность и стоимость конструкции.

Изначально следует сказать, что движение масс воздуха относительно земной поверхности происходит под воздействием разности атмосферного давления, определяемого барическим градиентом, силой трения, отклоняющейся силой вращения земли и центробежной силой. Сила трения заметно оказывается в нижних сотнях метров. Барический градиент (бар – единица давления, принятая в метеорологии), являющийся разностью давления обычно на один градус меридiana, выражается в миллибараах A000 мбар = 750 мм рт. ст.).

Из-за турбулентности воздушного потока скорость и направление в той или иной мере достаточно сильно колеблются. Станционными приборами, определяющими величину скорости ветра, как осредненную величину, являются флюгеры, анемометры и другие, а в свободной атмосфере на больших высотах это делаются при помощи радиозондов, шаропилотных наблюдений и аэростатов. Скорость ветра измеряется в м/сек, иногда оценивается узлами или баллами международной шкалы. Например, узел – это 1 морская миля в час (около 0,5 м/сек). Направление ветра указывают по 8 или 16 румбам горизонта или по азимутальным углам, считая за «0» направление на север; углы отсчитывают по часовой стрелке. Особое значение для общей циркуляции атмосферы имеют возникающие области низкого и высокого

атмосферного давлений, называемые циклонами и антициклонами. Они часто наблюдаются в средних широтах и вызывают сильные воздушные течения.

Трение частиц воздуха о поверхность земли отклоняет направление ветра от прямолинейного так, что слева по движению остается более низкое атмосферное давление. С ростом высоты над поверхностью земли влияние силы трения уменьшается, что приводит к повышению скорости ветра. На большой высоте, где влияние трения о поверхность земли исчезает, а движение установившееся и равномерное, ветер дует по изобаре. В метеорологии такое движение ветра называют градиентным. Изобары циклонов и антициклонов не прямые линии, а замкнутые формы эллипсов и окружностей; по которым происходит движение воздушных масс, вследствие чего непредотвратимо возникновение центробежной силы. Для вихря, вращающегося против часовой стрелки, в случае когда в его центре наблюдается пониженное давление, т. е. циклон, радиус действия которого достигает 3000 км, характерны большая порывистость и сильные осадки.

Наиболее опасны и разрушительны по своей силе тропические циклоны, иногда движущиеся со скоростью более 50 м/сек. В зоне Карибского моря такие ураганы причиняют колоссальные разрушения и уносят сотни, а иногда и тысячи человеческих жизней. В Восточной Азии их принято называть тайфунами. Они обрушаются и на наш Дальний Восток, наиболее сильно страдают от них Курильские острова.

Вихри над морем или океаном называют смерчами, над сушей – тромбами. По визуальным наблюдениям скорость ветра в них достигает 100 м/сек.

Предвестником абсолютно каждого смерча является длительная жаркая погода и низкая влажность воздуха. Вследствие низкого давления воздуха внутри вихря и огромной скорости вращения смерч всасывает в свою полость воду, землю и все окружающие предметы, встречающиеся на его пути. Летом 1904 г. над Москвой пронесся тромб, почти полностью уничтоживший

Анненгофскую рощу, разрушивший массу зданий в Лефортове, в окрестностях Москвы и близлежащих селах. Скорость ветра достигала 60 м/сек.

В атмосфере движение ветра турбулентное. С турбулентностью атмосферы связана порывистость ветра. При значительных кратковременных отклонениях от средних величин скорости говорят о шквалистости ветра. Порывистость ветра в исследованиях характеризуют с помощью средних квадратов пульсации составляющих скорости ветра и стандартных отклонений. Восходящие и нисходящие потоки воздуха могут вызвать вихрь с горизонтальной осью – шквал: ветер как бы скачком повышается от слабого до ураганного, достигая 30 м/сек иногда и более. В Москве шквал в мае 1937 года причинил огромные разрушения, хотя продолжался всего 3– 4 мин. Сильные шквалы наблюдаются при жаркой сухой погоде, длившейся в течение многих дней.

2.2 Действие ветра на сооружение

Ветровая нагрузка на сооружения стала привлекать внимание строителей еще в прошлом столетии в связи с появлением стальных конструкций мостов больших пролетов, а применение мачт и башен высотой до 600 м заставило обратить внимание на профиль ветра по высоте. За последнее время интерес к ветровой нагрузке появился у авторов проектов высотных зданий, строителей заводов с оборудованием, расположенным на открытом воздухе. Ветровая нагрузка стала доминирующей для линий электропередачи напряжением 220 кв и более.

Появление сооружений, деформативность которых во многом определяет нормальное протекание технологического процесса, заставило по-иному взглянуть на ветровую нагрузку, не ограничивая ее ролью участника только в прочностных расчетах. Все более широкое внедрение теории вероятностей и математической статистики в практику проектирования строительных конструкций потребовало сведений о вероятности ветров различной силы. Более того, расчет строительных конструкций на ветровую

нагрузку стал неотделим от технологических вопросов, когда рассматривается общая надежность системы или выясняется ее оптимальное решение.

Совершенствование методики расчета сооружений, внедрение высокопрочных материалов привело к повышению гибкости конструкций и облегчению их веса, а также заставило отказаться от взгляда на ветровую нагрузку только как на статическую. Вопросы порывистости ветра важны при проектировании гибких сооружений, динамическое действие ветра на которые вызывает иную реакцию, чем на жесткие или массивные конструкции. Для сооружений, характерных большими периодами свободных колебаний, особенно у таких, ветровая нагрузка на которые определяет их прочность, нельзя ограничиваться учетом порывистого характера ветра только введением динамического коэффициента в статический расчет.

Ранее порывы ветра рассматривали в виде упругого удара на сооружение и учитывали это вводе динамический коэффициентом в расчет. При таком подходе оставался открытый вопрос о влиянии повторных порывов ветра, что привело к введению еще коэффициента повторяемости.

Ветровая нагрузка на сооружение зависит от скорости и порывистости ветра, параметров конструкции, включая ее динамические характеристики, формы аэродинамических коэффициентов, размеров и положения конструкции относительно потока. Аэродинамические коэффициенты определяют опытным путем.

Ветровая нагрузка на сооружение Q , кг, может быть определена по формуле

$$Q = n \cdot \sum c_x \cdot \beta \cdot q \cdot S, \quad (2.1)$$

где n – коэффициент перегрузки, вводимый при расчете сооружений по предельным состояниям;

c_x – аэродинамический коэффициент – коэффициент лобового сопротивления;

q – нормативный скоростной напор ветра на уровне середины рассматриваемого участка сооружения;

β – коэффициент, называемый динамическим, учитывающий реакцию сооружения на действие порывов ветра;

S – проекция площади сооружения на плоскость, нормальную к направлению ветра.

Здесь скоростной напор ветра q , кг/м², находится по следующей формуле

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2, \quad (2.2)$$

где ρ – плотность воздуха, зависящая от давления, температуры и влажности;

V – скорость ветра в м/сек.

На больших высотах, в условиях Крайнего Севера температура воздуха может быть ниже нормальной, принимаемой в стандартной атмосфере равной 15° С, что вызывает повышение расчетного скоростного напора ветра и что иногда учитывают в расчетах.

При неизменной температуре воздуха атмосферное давление с высотой понижается. Это приводит к снижению скоростного напора ветра вследствие уменьшения плотности воздуха. Чаще всего температура воздуха с высотой снижается, что, учитывая понижение атмосферного давления с высотой, позволяет оперировать с постоянным значением плотности воздуха, равным 0,125 кг·сек²/м². Тогда скоростной напор ветра q , кг/м², будет находиться по формуле

$$q = \frac{V^2}{16}, \quad (2.3)$$

где V – то же что в формуле (2.2).

Формула дает представление, что ветровую нагрузку на сооружение сначала необходимо определить приближенно. Затем назначить размеры конструкции, после чего выяснить ее динамические параметры и, наконец, откорректировать величину динамического коэффициента, зависящего от периода свободных колебаний и логарифмического декремента затухания.

Сама природа ветра, когда на среднюю скорость накладываются порывы ветра, подсказывает представления ветровой нагрузки в виде двух компонент, одна из которых статическая, а другая – динамическая. Математически это выглядит следующим образом

$$q_p = n \cdot (q_0 + q_d), \quad (2.4)$$

где n – коэффициент перегрузки, учитывающий возможное повышение нормативного скоростного напора;

q_0 – нормативный скоростной напор;

q_d – динамический скоростной напор.

Коэффициент перегрузки определяется из вероятности появления скорости ветра за больший промежуток времени, чем принятый при определении нормативной величины скоростного напора.

Если в формулу ввести коэффициент пульсации скоростного напора, т. е. динамической добавки, определяемой статистическим путем, коэффициент динамичности, учитывающий реакцию сооружения на пульсацию ветра, тогда расчетный скоростной напор ветра q_p будет находиться из

$$q_p = n \cdot q_0 \cdot (1 + \xi m), \quad (2.5)$$

где m – коэффициент пульсации скоростного напора;

ξ – коэффициент динамичности, учитывающий реакцию сооружения на пульсацию ветра;

q_0 – то же что в формуле (2.4);

n – то же что в формуле (2.4).

Иначе говоря

$$q_p = n \cdot \beta \cdot q_0, \quad (2.5)$$

где q_0 – то же что в формуле (2.4);

n – то же что в формуле (2.4);

$\beta = 1 + \xi m$ – коэффициент, учитывающий динамический характер воздействия порывов ветра;

m – то же что в формуле (2.5);

ξ – то же что в формуле (2.5).

Действие порывов ветра на сооружение зависит от периода свободных колебаний и, что не менее важно, от затухания, характеризуемого чаще всего логарифмическим декрементом «б». Последний зависит от вида основного материала и конструктивного решения. Декремент затухания, определяемый опытным путем, принимают по полученным данным о поведении подобных конструкций.

Динамические коэффициенты могут быть представлены в виде семейства кривых в функции периода свободных колебаний сооружения. На рисунке 2.1 приведены графики для трех характерных групп: гибких стальных конструкций, металлических, деревянных и железобетонных и каменных, что

следует из рекомендаций [18]. Эти графики являются осредненными для всех семи ветровых районов строительства по интенсивности ветровой нагрузки.

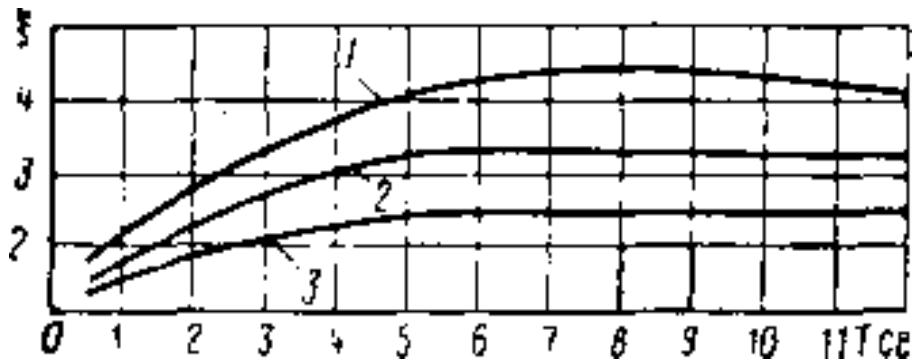


Рисунок 2.1 – Коэффициент динамичности в зависимости от периода свободных колебаний сооружений

- 1 – для гибких стальных сооружений ($b \leq 0,1$);
- 2 – для металлических и деревянных сооружений ($b \leq 0,15$);
- 3 – для железобетонных и каменных сооружений ($b \geq 0,3$)

Влияние порывов ветра на сооружение становится пренебрежимо малым, если период его свободных колебаний меньше 0,25 сек.

Период свободных колебаний сооружения определяют обычным путем, после чего по рисунку 1 находят коэффициент для рассматриваемого вида конструкций, а затем по формуле (2.5) определяют коэффициент, учитывающий динамический характер воздействия порывов ветра.

Для гибких сооружений, большепролетных мостов и других, характеризуемых значительно большим влиянием высших форм свободных колебаний, нельзя ограничиться учетом только основного тона.

Например, вертикальные консольные стержни большой гибкости, что характерно для телевизионных башен, различных выставочных конструкций, монументов, оказываются перегруженными, если в их расчетах не были учтены вторая и третья формы свободных колебаний.

В мачтах с оттяжками иногда учитывают и четвертую гармонику согласно [3]

Аэродинамические коэффициенты, связывающие сопротивление конструкций ветру и наветренную площадь, определяют по справочным материалам, основанным на исследовании моделей и, реже, натуры. Величина

ветровой нагрузки зависит от абсолютных размеров сооружения, потому что среднее удельное давление на большое по площади тело, например щит, меньше, чем на подобное по форме тело, но меньших размеров.

Суммарная ветровая нагрузка на горизонтальные провода, канаты, а также на большой длины сооружения, по данным натурных наблюдений, оказывается меньше, чем следовало бы из рассмотрения постоянной по пролету наибольшей расчетной скорости ветра. Это учитывают понижающими коэффициентами при расчете проводов линий электропередачи и других конструкций.

Коэффициент перегрузки, вводимый в расчет прочности, зависит от назначения сооружения, планируемого срока службы и роли ветра в общем комплексе нагрузок. Для высоких сооружений и других, преобладающее значение ветровой нагрузки для которых, очевидно, коэффициент перегрузки принимают 1,3, т. е. выше, что и учтено [3]

Для проектирования радиомачт и телевизионных опор, опор линий передачи электрической энергии, конструкций подъемных кранов издают свои правила. Ветровую нагрузку на железнодорожные, автодорожные и городские мосты, канатные дороги, кабель-краны, перегружатели часто выделяют в отдельные нормативные документы, базирующиеся на основных нормах-стандартах.

При проектировании уникальных сооружений, большепролетных мостов, выставочных павильонов, часто самой разнообразной формы, требуется более тщательное рассмотрение ветровой нагрузки, в котором наряду с рациональным назначением величины скоростного напора ветра большое внимание уделяют аэродинамическому комплексу вопросов. Часто без исследований моделей сооружения в аэродинамической трубе нельзя обойтись. Это, например, стало обязательным при проектировании, висячих мостов, радиотелескопов, радиомачт большой высоты.

2.3 Принципы расчета ветровой нагрузки согласно действующим нормативным документам

Сейчас расчеты на ветровую нагрузку ведутся согласно [3], в главе 11. Дальше следует описать алгоритм его расчета.

Согласно нормам [3] для зданий и сооружений необходимо учитывать следующее воздействия ветра:

- а) основной тип ветровой нагрузки (в дальнейшем – «ветровая нагрузка»);
- б) пиковые значения ветровой нагрузки, действующие на конструкционные элементы ограждения и элементы их крепления;
- в) резонансное вихревое возбуждение;
- г) аэродинамические неустойчивые колебания типа галопирования, дивергенции и флаттера [3. п. 14];

Резонансное вихревое возбуждение и аэродинамические неустойчивые колебания типа галопирования необходимо учитывать для зданий и сплошно-стенчатых сооружений, у которых $h/d > 10$, где h – высота, d – характерный поперечный размер.

Расчет каркаса следует производить для основного типа ветровой нагрузки.

Нормативное значение ветровой нагрузки W следует определять по формуле

$$W = W_m + W_p, \quad (2.6)$$

где W_m – средней составляющая ветровой нагрузки;

W_p – пульсационная составляющая ветровой нагрузки.

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки W_m следует определять по формуле

$$W_m = W_0 \cdot k(z_e) \cdot c, \quad (2.7)$$

где W_0 – нормативное значение ветрового давления; принимается в зависимости от ветрового района по [3, табл. 11.1].

z_e – эквивалентной высоты над поверхностью земли;

k – коэффициент;

c – аэродинамический коэффициент [3, 11.1.7]

Эквивалентная высота z_e определяется для зданий и сооружений следующим образом:

а) при $h \leq d \rightarrow z_e = h$;

б) при $h \leq 2d$:

для $z \geq h - d \rightarrow z_e = h$;

для $0 < z < h - d \rightarrow z_e = d$;

в) при $h > 2d$:

для $z \geq h - d \rightarrow z_e = h$;

для $d < z < h - d \rightarrow z_e = z$;

для $0 < z \leq d \rightarrow z_e = d$;

Здесь z – высота от поверхности земли;

d – размер здания (без учета его стилобатной части) в направлении, перпендикулярном расчетному направлению ветра (поперечный размер);

h – высота здания.

Согласно [3, 11.1.8 г] при навесов, размещаемых в местностях типа В, пульсационную составляющую ветровой нагрузки допускается определять по формуле

$$W_p = W_m \cdot \xi(Z_e) \cdot v, \quad (2.8)$$

где W_m – то же что в формуле (2.6);

$\xi(Z_e)$ – коэффициент пульсации давления ветра [3], табл. 11.4];

v – коэффициент пространственной корреляции (взаимосвязи) пульсации давления ветра. Этот коэффициент следует определять для расчетной поверхности сооружения или отдельной конструкции, для которой учитывается корреляция пульсаций.

Расчетная поверхность включает в себя те части наветренных и подветренных поверхностей навеса. $v_{+(-)}$ – коэффициенты корреляции ветровой нагрузки, соответствующие положительному давлению (+) и отсосу (-), [3, табл. 11.8];

Расчетное значение ветровых нагрузок на 1 м² поверхности W подсчитывается по формуле

$$W = W_n \cdot \gamma_f, \quad (2.9)$$

где $W_n = W_m + W_p$ – нормативное значение ветровой нагрузки;

$\gamma_f = 1,4$ – коэффициент надежности по нагрузке для ветровой нагрузки [3, п. 11.1.12]

В практических расчетах ветровую нагрузку от уровня земли до отметки расчетной оси продольной несущей балки конструкции или здания принимают равномерно распределённой и находят по формуле

$$q_{eq} = W \cdot B, \quad (2.10)$$

где W – тоже что в формуле (2.8);

B – ширина грузовой площади, равная шагу рам здания либо шагу поперечных балок конструкции, делящему ее на части. При наличии

продольного фахверка ветровая нагрузка при расчете на здание на колонны принимается с учетом шага стоек фахверка.

Согласно [3, п. 11.1.2] навесы необходимо учитывать пиковые положительные W_+ и отрицательные W_- воздействия ветровой нагрузки, нормативные значения которых определяются по формуле

$$W_{+(-)} = w_0 \cdot k(z_e) \cdot [1 + \zeta(z_e)] \cdot c_{p,+(-)} \cdot v_{+(-)}, \quad (2.11)$$

где w_0 – нормативное значение давления ветра;

z_e – эквивалентная высота;

$k(z_e), \zeta(z_e)$ – коэффициенты, учитывающие, соответственно, изменение давления и пульсаций давления ветра на высоте z_e ;

$c_{p,+(-)}$ – пиковые значения аэродинамических коэффициентов положительного давления (+) или отсоса (-);

$v_{+(-)}$ – коэффициенты корреляции ветровой нагрузки, соответствующие положительному давлению (+) и отсосу (-); значения этих коэффициентов приведены в таблице 2.1 в зависимости от площади ограждения A , с которой собирается ветровая нагрузка.

Таблица 2.1 Значения коэффициентов корреляции ветровой нагрузки

A, m^2	<2	5	10	>20
V_+	1	0,9	0,8	0,75
V_-	1	0,85	0,75	0,65

2.3.1 Схемы задания ветровой нагрузки на расчетную схему навеса

Согласно нормам [3, приложение В.1.10] для навесов необходимо учитывать следующее воздействие ветра, изображенное на рисунке 2.2

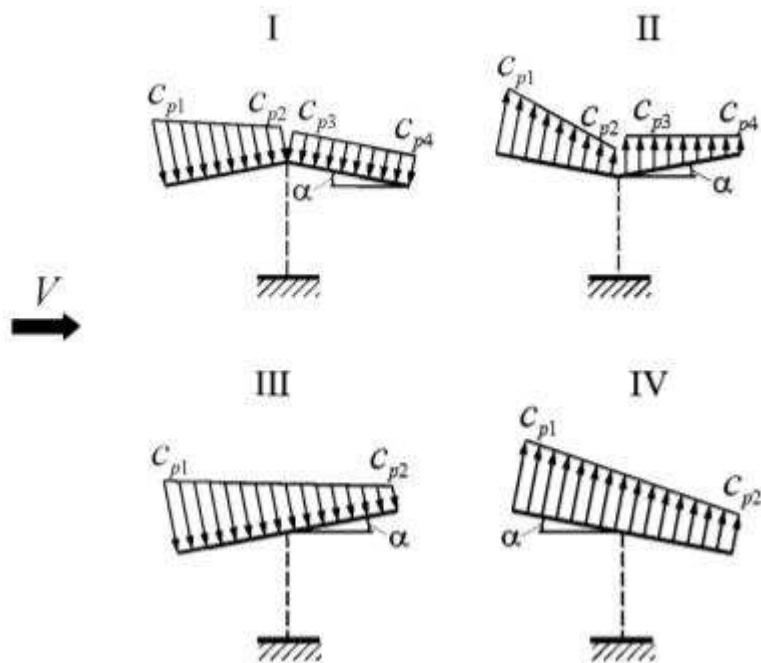


Рисунок 2.2 – Расчетные схемы задания ветровых нагрузок
 C_p – аэродинамические коэффициенты

В зависимости от вида схемы, изображенной на рисунке 2.2, а также от угла наклона покрытия навеса аэродинамические коэффициенты C_p принимают по таблице 2.2

Таблица 2.2 Значения коэффициентов C_p при расчете навесов

Тип схемы	α , град	Значения коэффициентов			
		c_{p1}	c_{p2}	c_{p3}	c_{p4}
I	10	0,5	-1,3	-1,1	0
	20	1,1	0	0	-0,4
	30	2,1	0,9	0,6	0
II	10	0	-1,1	-1,5	0
	20	1,5	0,5	0	0
	30	2	0,8	0,4	0,4
III	10	1,4	0,4	-	-
	20	1,8	0,5	-	-
	30	2,2	0,6	-	-
IV	10	1,3	0,2	-	-
	20	1,4	0,3	-	-
	30	1,6	0,4	-	-

Примечания к таблице 2.2:

1 Коэффициенты c_{p1} , c_{p2} , c_{p3} , c_{p4} соответствуют суммарному давлению на верхнюю и нижнюю поверхности навесов;

2 Для отрицательных значений c_{p1} , c_{p2} , c_{p3} , c_{p4} направление давления на схемах следует изменять на противоположное.

3 Для навесов с волнистыми покрытиями аэродинамический коэффициент трения $c_f = 0,04$.

4 Для горизонтально расположенных навесов необходимо рассмотреть два варианта нагружения, соответствующие схемам III и IV при $\alpha = 10^\circ$.

Соответствующие к исходным схемам конструкций навеса назначают из таблицы коэффициенты C_p , которые уточняют действие динамической стороны ветра, и применяют при расчете ветровой нагрузки.

2.4 Выводы по главе 2

Подрезюмируем проделанную работу по главе 2:

1 Учёт ветровой нагрузки на сооружения является очень важным фактором, который стоит учитывать на всех стадиях проектирования и строительства зданий и сооружений.

2 Нормативные документы обязуют выполнять расчеты конструкций на пиковую составляющую ветровую нагрузку при проектирование навесов.

Глава 3 Статический расчет светопрозрачного вантового козырька

3.1 Исходные данные

Проектируемая конструкция цельностеклянного консольного вантового навеса располагается на Реконструкции терминала №1 Международного аэропорта Красноярск, расположенного в Емельяновском районе г. Красноярска.

Цельностеклянный козырек выполнен из несущего металлокаркаса с заполнением многослойным стеклом, устанавливаемого на существующие конструкции здания.

Заполнение конструкции цельностеклянного козырька производится стеклом многослойным – триплекс, формула которого имеет вид: 12Optiwhite зак. + SentryGlas 1,52 + 12Optiwhite зак, согласно расчетам на прочность стекла, расчет которого представлен в приложении А.

Основные размеры рассчитываемого фрагмента козырька, схемы расположения основных элементов конструкции, продольный и поперечный разрезы приведены на чертежах КР, представленных в приложении Б.

На конструкцию козырька, учитывались следующее нагрузки согласно [3]

- 1 Собственный вес конструкций (металлоконструкций и многослойного стекла);
- 2 Снеговая нагрузка;
- 3 Ветровая нагрузка;
- 4 Пиковая ветровая нагрузка

Используемыми программными комплексами для расчета строительных конструкций были «Autodesk Robot Structural Analysis», «SCAD Office 21», а также «Лира 10». Связано это с тем, что полученные результаты по расчетным комплексом сравнялись и делались по ним выводы. Все перечисленные расчетные комплексы предназначены для статических и динамических

расчетов и проектирования плоских и пространственных конструкций, как стержневых, так и пластинчатых.

Проектируемый навес здания аэропорта расположен по адресу: Красноярский край, Емельяновский район, аэропорт Красноярск имени Д.А. Хворостовского, 1/1.

Климатические характеристики района строительства:

- климатический район строительства - I согласно [4]
- климатический подрайон строительства - В [4];
- расчетная температура воздуха - минус 37°C согласно [4];
- нормативная снеговая нагрузка для III снегового района, соответствующего городу Красноярску – 1,5 кН/м² согласно [3]
- скоростной напор ветра для III ветрового района – 0,3 КПа согласно [3]
- тип местности по ветровому воздействию – «В» согласно [3];

Сейсмичность района – 7 баллов.

Расчетная температура наружного воздуха составляет - 37°C, преобладающие ветра: юго-западного и западного направления согласно согласно [4]

3.2 Описание конструкции

Светопрозрачная вантовая конструкция расположена в аэропорту п. Емельяново г. Красноярска. Это висячая структура представляет собой вантовый консольный навес, общей протяженностью 103 м, структура которого состоит из следующих элементов:

Ванты выполнены в виде канатных металлических тросов длиной в натяженнном состоянии 5400-4430 мм в зависимости от их расположения;

Балки, соединяющие вдоль длины здания между железобетонными колоннами, запроектированы в виде стального квадратного профиля 160x5.

Поперечные балки выполнены из стального прокатного таврового профиля 190x50x10 длиной 2000 мм с устройством декоративной треугольной перфорацией;

Продольные балки выполнены из прокатного трубчатого стального профиля 50x4 и уложены вдоль всей длины конструкции.

Покрытие – стекло триплекс толщиной – 25,52 мм (3-ех слойное: 1 слой – закаленное прозрачное стекло Optiwhite толщиной 12 мм, 2 слой – склеивающая армированная пленка SentryGlas 1.52 мм, 3 слой – закаленное прозрачное стекло Optiwhite толщиной 12 мм).

На рисунке 3.1 представлена перспектива фасада аэропорта, на котором отображена вантовая светопрозрачная конструкция, расположенная вдоль здания.

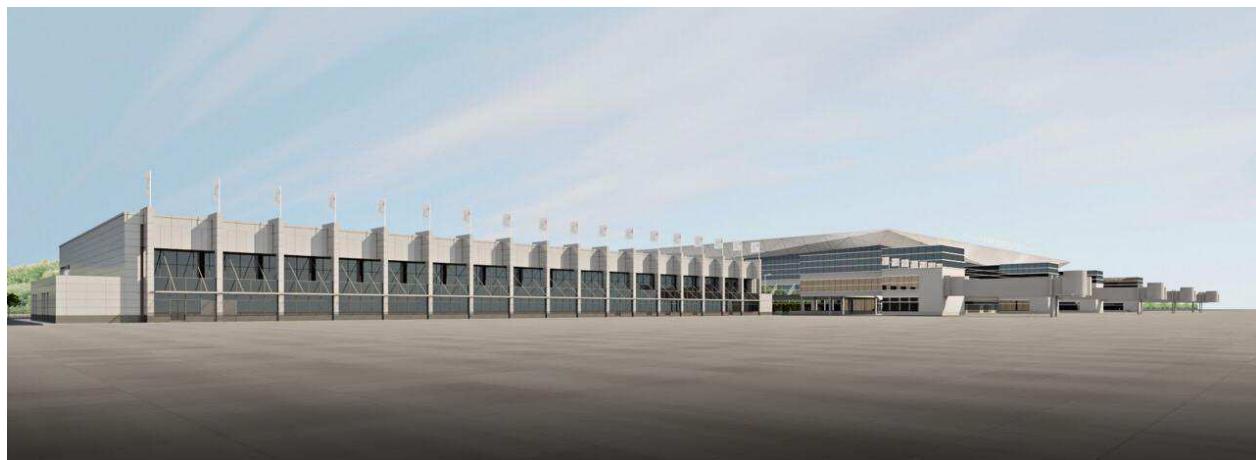


Рисунок 3.1 – Перспектива фасада аэропорта со взлетно-посадочной полосы

На рисунке 3.2 представлен фрагмент визуализации фасада здания, на котором изображен архитектурный облик навеса.

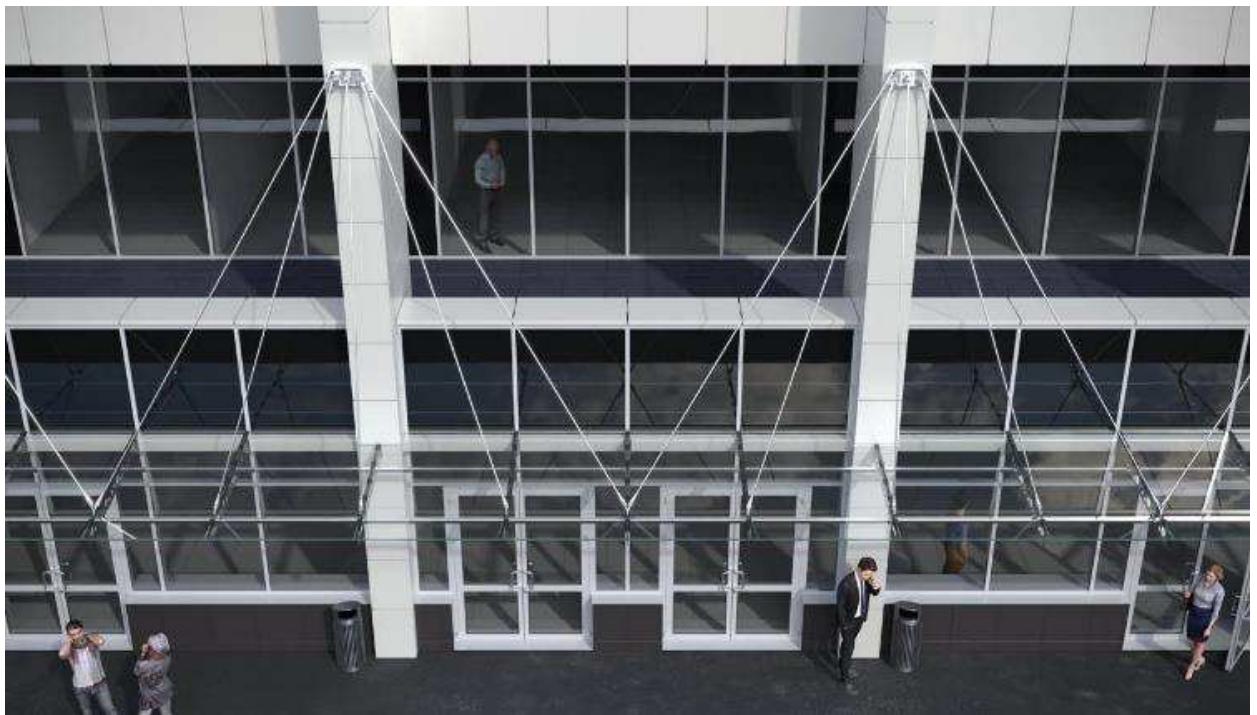


Рисунок 3.2 – Фрагмент визуализированного фасада здания

Фрагмент архитектурного плана козырька длиной 6 метров изображен на рисунке 3.3

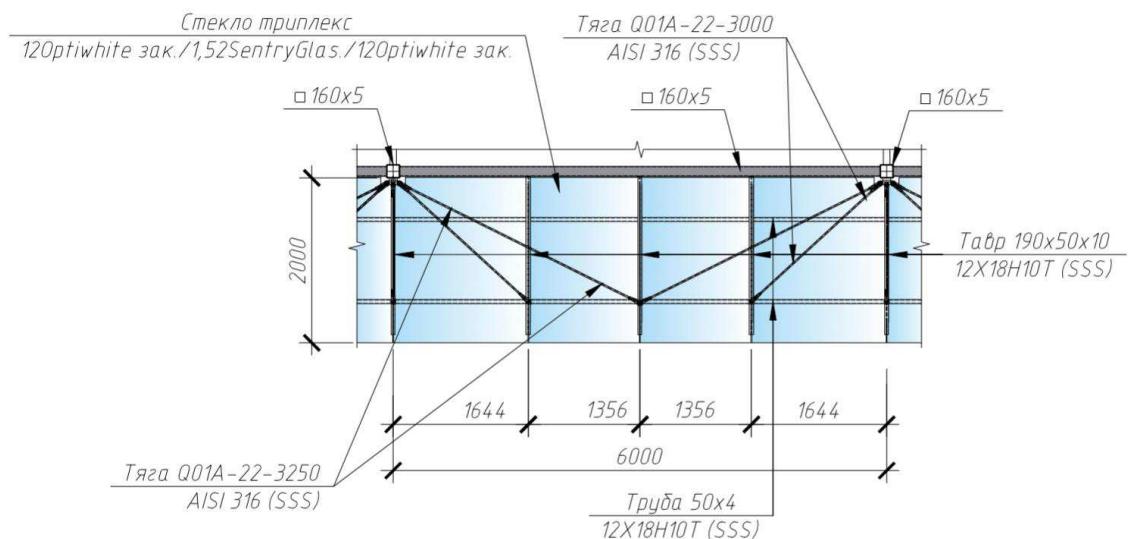


Рисунок 3.3 – Фрагмент архитектурного плана козырька длиной 6 метров

На рисунке 3.4 изображен разрез по наружной стене аэропорта с узлом 1

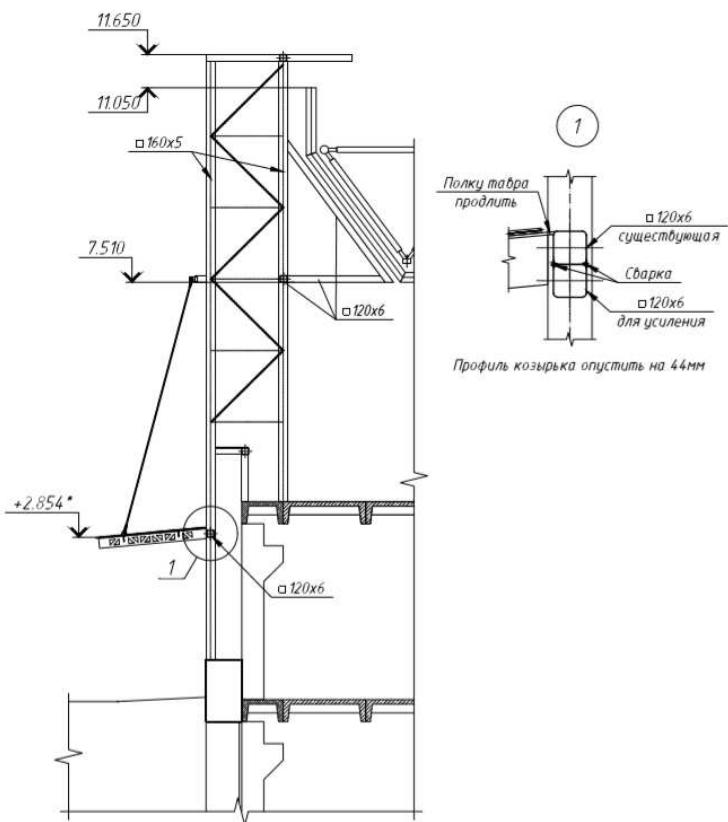


Рисунок 3.4 – Фрагмент архитектурного плана козырька длиной 6 метров с узлом 1

В данной работе расчеты проводились только для типового пролета длиной 12 м.

Конструктивно конструкция выполнена из стального проката. Ванты шарнирно-закрепленные к металлическим колоннам крепятся при помощи закладных деталей к поперечным балкам, по которым в свою очередь уложен триплекс. Поперечные балки жестко-защемлены к выступающим из фасада здания колоннам и имеют угол наклона в 95° от вертикали колонны, обеспечивая этим сход с покрытия талых вод, а также снега.

3.3 Цель расчета

Изначально согласно поставленной гипотезе необходимо выполнить расчет вантовой светопрозрачной конструкции на действие всех воспринимающей ей нагрузок и проанализировать работу уже запроектированных элементов конструкции, представленных в пункте 3.2. Затем согласно результатам анализа сделать выводы об эффективности конструкции, ее рациональности

3.4 Сбор нагрузок

3.4.1 Нагрузка от собственного веса

В качестве постоянных нагрузок в подобных консольно-вантовых козырьках выступают:

- 1 Собственный вес многослойного безопасного стекла;
- 2 Собственный вес поперечных консольных балок в виде стального прокатного таврового профиля 190x50x10 длиной 2000 мм, на которые укладывается покрытие в виде стекла;
- 3 Собственный вес продольных балок из прокатного трубчатого стального профиля длиной 1,64, 1,35 метра в зависимости от шага поперечных консольных балок
- 4 Собственный вес вант исполненных в виде канатных металлических тросов (тяг) длиной в натяженном состоянии 5400-4430 мм в зависимости от их расположения;
- 5 Собственный вес несущей балки, соединяющие вдоль длины здания между железобетонными колоннами, запроектированые в виде стального квадратного профиля 160x5.

Постоянные нагрузки, действующие на конструкцию, отображены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Постоянные нагрузки

№	Вид нагрузки	Нормативное значение, кН/м ²	Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	Расчетное значение, кН/м ²
1	Собственный вес стекла ($\gamma=2500 \text{ кг/м}^3$)	0,058	1,3	0,075
2	Собственный вес поперечных балок ($l=2 \text{ м}$)	0,033	1,05	0,034
3	Собственный вес продольных балок ($l=6 \text{ м}$)	0,034	1,05	0,035
4	Собственный вес вант ($l=5,4 \text{ м}$)	0,001	1,05	0,002

5	Собственный вес несущей балки (l=5,4 м)	0,143	1,05	0,150
	Итого:			0,296

3.4.2 Снеговая нагрузка

Значение снеговой нагрузки, действующий на конструкцию, отображены в таблице 3.2.

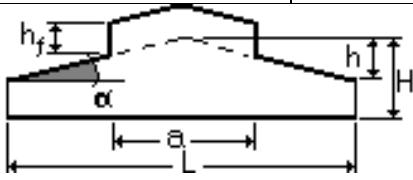
Таблица 3.2 – Снеговые нагрузки

№пп	Вид нагрузки	Нормативное значение, кН/м ²	Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	Расчетное значение, кН/м ²
1	Снеговая нагрузка	1,5	1,4	2,1
	Итого:	1,5		2,1

Исходные данные для расчета снеговой нагрузки выполнены в таблице 3.3

Таблица 3.3 – Расчет снеговой нагрузки по ПК «Вест»

Параметр	Значение	Единицы измерения
Местность		
Нормативное значение снеговой нагрузки	1,5	кН/м ²
Тип местности	В - Городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м	
Средняя скорость ветра зимой	5	м/сек
Средняя температура января	0	°C
Здание		

Параметр	Значение	Единицы измерения
		
Высота здания Н	11,5	м
Ширина здания В	103	м
h	4,14	м
α	5	град
L	33	м
h_f	4,14	м
a	29	м
Покрытие	Стекло	
Неутепленная конструкция повышенным тепловыделением	Нет	
Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	1,4	

Согласно таблице 3.3 был выполнен программный расчет на определение расчетной величины снеговой нагрузки. Результаты программного расчета выполнены согласно [3]

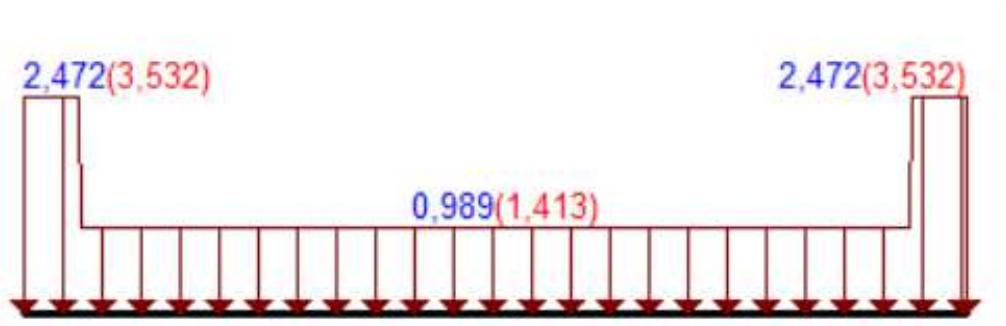


Рисунок 3.5 – Снеговая нагрузка, кН/м²

Рисунок 3.5 соответствует действительной схеме распределения снеговой нагрузки.

3.4.3 Основная ветровая нагрузка

В рассматриваемом примере районом строительства является г. Красноярск, который расположен в III районе по скоростному напору ветра [3, прил. Ж], для которого нормативное значение ветрового давления, W_0 , равно $0,28 \text{ кН}/\text{м}^2$.

Принимаем тип местности В (городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м).

Определяем эквивалентную высоту до расчетной оси продольной балки при $h = 11,8 \text{ м} < l = 24 \text{ м}$, $z_e = h = 3,1 \text{ м}$.

Коэффициент, $k(z_e)$, учитывающий изменение ветрового давления для эквивалентной высоты $z_e=3,1 \text{ м}$, равен 0,5.

Аэродинамические коэффициенты по схемам нагружения ветровой нагрузки для навесов согласно [3, прил. Ж]:

$c_{p1} = 1,2$, $c_{p2} = 0,35$ для третьей схемы;

$c_{p1} = 1,25$, $c_{p2} = 0,15$ для четвертой схемы.

Коэффициент пульсации давления ветра, $\xi(z_e)$, при $z_e=3,1 \text{ м}$, равен 1,22.

Коэффициенты пространственной корреляции пульсаций давления ветра:

- для площади $A = 2 \cdot 1,44 = 2,88 \text{ м}^2$, $v = 0,949$;

- для площади $A = 2 \cdot 1,64 = 3,28 \text{ м}^2$, $v = 0,904$.

Расчет нагрузки «сверху», то есть по схеме 3 согласно [СП20, прил.Ж]

Равномерно распределенные ветровые нагрузки на 1 м^2 поверхности покрытия:

- нормативные значения средней составляющей ветровой нагрузки W_{m1} , находим по формуле (2.7)

Принимаем:

$W_0 = 0,38 \text{ кН}/\text{м}^2$;

$k(z_e) = 0,5$;

$c = 1,2$

Подставляем значения в формулу (2.7), получаем

$$W_{m1} = 0,38 \cdot 0,5 \cdot 1,2 = 0,228 \frac{\text{kH}}{\text{m}^2};$$

- нормативные значения средней составляющей ветровой нагрузки W_{m2} , находим по формуле (2.7)

Принимаем:

$$W_0=0,38 \text{ kH/m}^2;$$

$$k(z_e)=0,5;$$

$$c=0,35$$

Подставляем значения в формулу (2.7), получаем

$$W_{m2} = 0,38 \cdot 0,5 \cdot 0,35 = 0,066 \frac{\text{kH}}{\text{m}^2};$$

- нормативные значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_{p1} , находим по формуле (2.8)

Принимаем:

$$W_{m1}=0,228 \text{ kH/m}^2;$$

$$\xi(Z_e)=1,22;$$

$$\nu=0,949$$

Подставляем значения в формулу (2.8), получаем

$$W_{p1} = 0,228 \cdot 1,22 \cdot 0,949 = 0,251 \frac{\text{kH}}{\text{m}^2};$$

- нормативные значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_{p2} , находим по формуле (2.8)

Принимаем:

$$W_{m2}=0,066 \text{ kH/m}^2;$$

$$\xi(Z_e) = 1,22;$$

$$v = 0,949$$

Подставляем значения в формулу (2.8), получаем

$$W_{p2} = 0,066 \cdot 1,22 \cdot 0,949 = 0,073 \frac{\text{kH}}{\text{m}^2};$$

- нормативные значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_{p3} , находим по формуле (2.8)

Принимаем:

$$W_{m1} = 0,228 \frac{\text{kH}}{\text{m}^2};$$

$$\xi(Z_e) = 1,22;$$

$$v = 0,909$$

Подставляем значения в формулу (2.8), получаем

$$W_{p3} = 0,228 \cdot 1,22 \cdot 0,909 = 0,263 \frac{\text{kH}}{\text{m}^2};$$

- нормативные значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_{p4} , находим по формуле (2.8)

Принимаем:

$$W_{m2} = 0,066 \frac{\text{kH}}{\text{m}^2};$$

$$\xi(Z_e) = 1,22;$$

$$v = 0,909$$

Подставляем значения в формулу (2.8), получаем

$$W_{p4} = 0,066 \cdot 1,22 \cdot 0,909 = 0,076 \frac{\text{kH}}{\text{m}^2}.$$

- расчетные значения ветровой нагрузки W_1 , находим по формуле (2.9)

Принимаем:

$$W_{m1}=0,228 \text{ кН/м}^2;$$

$$W_{p1}=0,251 \text{ кН/м}^2;$$

Подставляем значения в формулу (2.9), получаем

$$W_1 = 0,228 + 0,251 = 0,479 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2};$$

- расчетные значения ветровой нагрузки W_2 , находим по формуле (2.9)

Принимаем:

$$W_{m2}=0,066 \text{ кН/м}^2;$$

$$W_{p2}=0,073 \text{ кН/м}^2;$$

Подставляем значения в формулу (2.9), получаем

$$W_1 = 0,066 + 0,073 = 0,139 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2};$$

- расчетные значения ветровой нагрузки W_3 , находим по формуле (2.9)

Принимаем:

$$W_{m1}=0,228 \text{ кН/м}^2;$$

$$W_{p3}=0,263 \text{ кН/м}^2;$$

Подставляем значения в формулу (2.9), получаем

$$W_1 = 0,228 + 0,263 = 0,491 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2};$$

- расчетные значения ветровой нагрузки W_4 , находим по формуле (2.9)

Принимаем:

$$W_{m2}=0,066 \text{ кН/м}^2;$$

$$W_{p4}=0,076 \text{ кН/м}^2;$$

Подставляем значения в формулу (2.9), получаем

$$W_1 = 0,066 + 0,076 = 0,143 \frac{\text{kH}}{\text{m}^2}.$$

Расчет нагрузки «снизу», то есть по схеме 4 согласно [3, прил. Ж]

Равномерно распределенные ветровые нагрузки на 1 м² поверхности покрытия:

- нормативные значения средней составляющей ветровой нагрузки W_{m1} , находим по формуле (2.7)

Принимаем:

$$W_0 = 0,38 \text{ кН/м}^2;$$

$$k(z_e) = 0,5;$$

$$c = 1,25$$

Подставляем значения в формулу (2.7), получаем

$$W_{m1} = 0,38 \cdot 0,5 \cdot 1,25 = 0,237 \frac{\text{kH}}{\text{m}^2};$$

- нормативные значения средней составляющей ветровой нагрузки W_{m2} , находим по формуле (2.7)

Принимаем:

$$W_0 = 0,38 \text{ кН/м}^2;$$

$$k(z_e) = 0,5;$$

$$c = 0,15$$

Подставляем значения в формулу (2.7), получаем

$$W_{m2} = 0,38 \cdot 0,5 \cdot 0,15 = 0,028 \frac{\text{kH}}{\text{м}^2};$$

- нормативные значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_{p1} , находим по формуле (2.8)

Принимаем:

$$W_{m1}=0,237 \text{ кН/м}^2;$$

$$\xi(Z_e)=1,22;$$

$$\nu=0,949$$

Подставляем значения в формулу (2.8), получаем

$$W_{p1} = 0,237 \cdot 1,22 \cdot 0,949 = 0,261 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2};$$

- нормативные значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_{p2} , находим по формуле (2.8)

Принимаем:

$$W_{m2}=0,028 \text{ кН/м}^2;$$

$$\xi(Z_e)=1,22;$$

$$\nu=0,949$$

Подставляем значения в формулу (2.8), получаем

$$W_{p2} = 0,028 \cdot 1,22 \cdot 0,949 = 0,031 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2};$$

- нормативные значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_{p3} , находим по формуле (2.8)

Принимаем:

$$W_{m1}=0,237 \text{ кН/м}^2;$$

$$\xi(Z_e)=1,22;$$

$$\nu=0,909$$

Подставляем значения в формулу (2.8), получаем

$$W_{p3} = 0,237 \cdot 1,22 \cdot 0,909 = 0,274 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2};$$

- нормативные значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_{p4} , находим по формуле (2.8)

Принимаем:

$$W_{m2}=0,028 \text{ кН/м}^2;$$

$$\xi(Z_e)=1,22;$$

$$\nu=0,909$$

Подставляем значения в формулу (2.8), получаем

$$W_{p4} = 0,028 \cdot 1,22 \cdot 0,909 = 0,032 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}.$$

- расчетные значения ветровой нагрузки W_1 , находим по формуле (2.9)

Принимаем:

$$W_{m1}=0,237 \text{ кН/м}^2;$$

$$W_{p1}=0,261 \text{ кН/м}^2;$$

Подставляем значения в формулу (2.9), получаем

$$W_1 = 0,237 + 0,261 = 0,479 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2};$$

- расчетные значения ветровой нагрузки W_2 , находим по формуле (2.9)

Принимаем:

$$W_{m2}=0,028 \text{ кН/м}^2;$$

$$W_{p2}=0,031 \text{ кН/м}^2;$$

Подставляем значения в формулу (2.9), получаем

$$W_2 = 0,028 + 0,031 = 0,059 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2};$$

- расчетные значения ветровой нагрузки W_3 , находим по формуле (2.9)

Принимаем:

$$W_{m1}=0,237 \text{ кН/м}^2;$$

$$W_{p3}=0,274 \text{ кН/м}^2;$$

Подставляем значения в формулу (2.9), получаем

$$W_1 = 0,237 + 0,274 = 0,511 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2};$$

- расчетные значения ветровой нагрузки W_4 , находим по формуле (2.9)

Принимаем:

$$W_{m2}=0,028 \text{ кН/м}^2;$$

$$W_{p4}=0,032 \text{ кН/м}^2;$$

Подставляем значения в формулу (2.9), получаем

$$W_1 = 0,028 + 0,032 = 0,06 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}.$$

Согласно полученным расчетам в таблице 3.4 отображены результаты значений равномерно-распределенных трапецивидных ветровых нагрузок.

Таблица 3.4 – Результаты значений равномерно-распределенных трапецивидных ветровых нагрузок.

Средняя составляющая		Пульсационная составляющая		Нормативное значение, кН/м ²		Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	Расчетное значение, кН/м ²
Наим.	Знач.	Наим.	Знач.	Наим.	Знач.	Знач.	Знач.
Передача нагрузки «сверху» по схеме №3							
W_{m1}	0,228	W_{p1}	0,251	W_1	0,479	1,4	0,671
		W_{p2}	0,073	W_2	0,139		0,195
W_{m2}	0,066	W_{p3}	0,263	W_3	0,491		0,687
		W_{p4}	0,076	W_4	0,143		0,200
Передача нагрузки «снизу» по схеме №4							
W_{m1}	0,237	W_{p1}	0,261	W_1	0,498	1,4	0,697
		W_{p2}	0,031	W_2	0,059		0,083
W_{m2}	0,028	W_{p3}	0,274	W_3	0,511		0,715

		W_{p4}	0,032	W_4	0,06		0,084
--	--	----------	-------	-------	------	--	-------

3.4.4 Пиковая ветровая нагрузка

Согласно [3 п. 11.1.2] навесы необходимо учитывать пиковые положительные W_+ и отрицательные W_- воздействия ветровой нагрузки.

Расчет нагрузки «сверху», то есть по схеме 3 согласно [3, прил. Ж]

Нормативное значение пиковой ветровой нагрузки $W_{1(+)}$, находим по формуле (2.11)

Принимаем:

$$w_0=0,38 \text{ кН/м}^2;$$

$$k(z_e)=0,5;$$

$$\zeta(z_e)=1,22;$$

$$c=1,2$$

$$\nu=0,957$$

Подставляем значения в формулу (2.11), получаем

$$W_{1(+)} = 0,38 \cdot 0,5 \cdot [1 + 1,22] \cdot 1,2 \cdot 0,957 = 0,484 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$$

Нормативное значение пиковой ветровой нагрузки $W_{2(+)}$, находим по формуле (2.11)

Принимаем:

$$w_0=0,38 \text{ кН/м}^2;$$

$$k(z_e)=0,5;$$

$$\zeta(z_e)=1,22;$$

$$c=1,2$$

$$\nu=0,970$$

Подставляем значения в формулу (2.11), получаем

$$W_{2(+)} = 0,38 \cdot 0,5 \cdot [1 + 1,22] \cdot 1,2 \cdot 0,970 = 0,490 \frac{\text{kH}}{\text{m}^2}$$

Расчет нагрузки «снизу», то есть по схеме 4 согласно [3, прил. Ж]

Нормативное значение пиковой ветровой нагрузки $W_{3(+)}$, находим по формуле (2.11)

Принимаем:

$$w_0=0,38 \text{ кН/м}^2;$$

$$k(z_e)=0,5;$$

$$\zeta(z_e) = 1,22;$$

$$c=1,2$$

$$\nu=0,957$$

Подставляем значения в формулу (2.11), получаем

$$W_{3(+)} = 0,38 \cdot 0,5 \cdot [1 + 1,22] \cdot 1,25 \cdot 0,957 = 0,504 \frac{\text{kH}}{\text{m}^2}$$

Нормативное значение пиковой ветровой нагрузки $W_{4(+)}$, находим по формуле (2.11)

Принимаем:

$$w_0=0,38 \text{ кН/м}^2;$$

$$k(z_e)=0,5;$$

$$\zeta(z_e) = 1,22;$$

$$c=1,2$$

$$\nu=0,970$$

Подставляем значения в формулу (2.11), получаем

$$W_{4(+)} = 0,38 \cdot 0,5 \cdot [1 + 1,22] \cdot 1,25 \cdot 0,970 = 0,511 \frac{\text{kH}}{\text{m}^2}$$

Согласно полученным расчетам, в таблице 3.5 отображены результаты значений равномерно-распределенных пиковых ветровых нагрузок.

Таблица 3.5 – Результаты значений равномерно-распределенных пиковых ветровых нагрузок.

Нормативное значение, кН/м ²		Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	Расчетное значение, кН/м ²
Наим.	Знач.	Знач.	Знач.
Передача нагрузки «сверху» по схеме №3			
W ₁₊	0,484	1,4	0,677
W ₂₊	0,490		0,686
Передача нагрузки «сверху» по схеме №4			
W ₁₊	0,504	1,4	0,706
W ₂₊	0,511		0,715

3.4.5 Расчетные сочетания усилий

Согласно собранным нагружениям [3] требует составить комбинации загружений с расчетными коэффициентами сочетания. Это необходимо для анализа наиболее неблагоприятной нагрузки с последующими возникающими максимальными внутренними усилиями и напряжениями. После полученных максимальных значений усилий проводится конструктивный расчет конструкции.

Все нагрузки, воспринимаемые конструкцией, и их значения сведены и отображены в таблице 3.6

Таблица 3.6 – Сводная таблица загружений

№ п/п	Наименование	Нормативное значение, кН/м ²	Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	Расчетное значение, кН/м ²
Постоянные нагрузки				
L1	Собственный вес элементов конструкции	0,269	1,1	0,296
Временные нагрузки				
L2	Снеговая нагрузка	2,472	1,4	3,532

№ п/п	Наименование	Нормативное значение, кН/м ²	Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	Расчетное значение, кН/м ²
L3	Ветровая нагрузка по схеме №3 «сверху»	0,479	1,4	0,671
		0,139		0,195
		0,491		0,687
		0,143		0,200
L4	Ветровая нагрузка по схеме №4 «снизу»	0,498	1,4	0,697
		0,059		0,083
		0,511		0,715
		0,06		0,084
L5	Пиковая ветровая нагрузка по схеме №3 «сверху»	0,484	1,4	0,677
		0,490		0,686
L6	Пиковая ветровая нагрузка по схеме №4 «снизу»	0,504	1,4	0,706
		0,511		0,715

Комбинации загружений с расчетными коэффициентами сочетания представлены в таблице 3.7

Таблица 3.7 – Комбинации загружений с расчетными коэффициентами сочетания

№ п/п	Имя комбинации	Формула
При основной ветровой в «зимнее время»		
1	L6	$L1 \cdot 1 + L2 \cdot 0,9 + L3 \cdot 0,7 + L4 \cdot 0,5$
2	L7	$L1 \cdot 1 + L2 \cdot 0,9 + L4 \cdot 0,7 + L3 \cdot 0,5$
3	L8	$L1 \cdot 1 + L3 \cdot 0,9 + L4 \cdot 0,8 + L2 \cdot 0,5$
4	L9	$L1 \cdot 1 + L4 \cdot 0,9 + L3 \cdot 0,9 + L2 \cdot 0,5$
При пиковой ветровой в «зимнее время»		
5	L10	$L1 \cdot 1 + L2 \cdot 0,9 + L5 \cdot 0,7 + L6 \cdot 0,5$
6	L11	$L1 \cdot 1 + L2 \cdot 0,9 + L6 \cdot 0,7 + L5 \cdot 0,5$
7	L12	$L1 \cdot 1 + L5 \cdot 0,9 + L6 \cdot 0,8 + L2 \cdot 0,5$
8	L13	$L1 \cdot 1 + L6 \cdot 0,9 + L5 \cdot 0,9 + L2 \cdot 0,5$
При основной ветровой в «летнее время»		
9	L14	$L1 \cdot 1 + L3 \cdot 0,9 + L4 \cdot 0,9 + L2 \cdot 0$
10	L15	$L1 \cdot 1 + L3 \cdot 0,9 + L4 \cdot 0,5 + L2 \cdot 0$
11	L16	$L1 \cdot 1 + L4 \cdot 0,9 + L3 \cdot 0,5 + L2 \cdot 0$
При пиковой ветровой в «летнее время»		
12	L17	$L1 \cdot 1 + L5 \cdot 0,9 + L6 \cdot 0,9 + L2 \cdot 0$
13	L18	$L1 \cdot 1 + L5 \cdot 0,9 + L6 \cdot 0,5 + L2 \cdot 0$
14	L19	$L1 \cdot 1 + L6 \cdot 0,9 + L5 \cdot 0,5 + L2 \cdot 0$

3.4 Расчетная модель вантовой светопрозрачной конструкции в программных комплексах

Согласно поставленной цели было принято решение выполнить стрелево-пластинчатый расчет конструкции в нескольких программных комплексах с целью проверки полученных результатов и анализа их расхождения.

В «перерасчете» программными комплексами послужили:

1 SCAD Office 21

2 ЛИРА 10

3 Autodesk Robot Structural Analysis

Расчетная схема в ПК «SCAD» изображена на рисунках 3.6-3.7

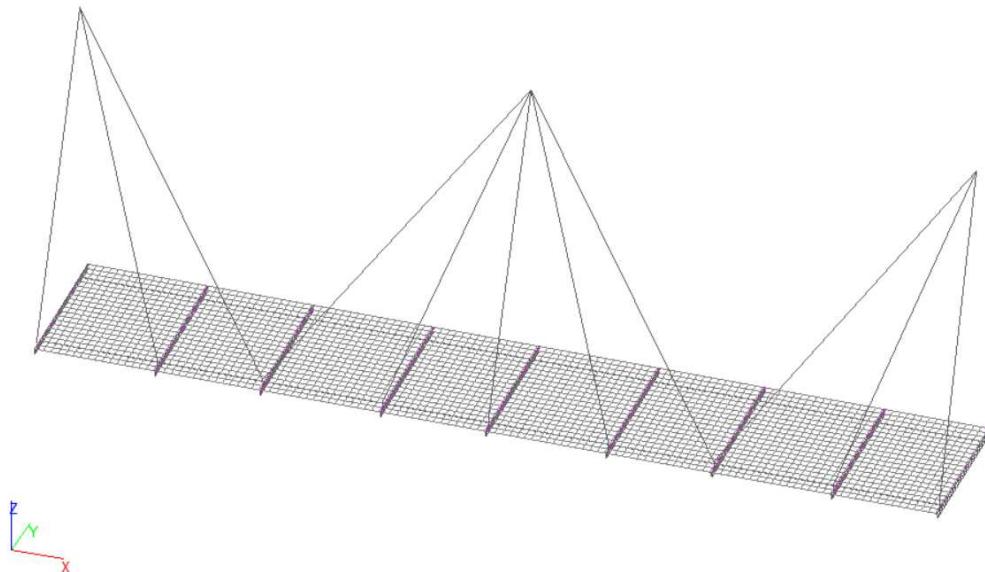


Рисунок 3.6 – Расчетная схема конструкции

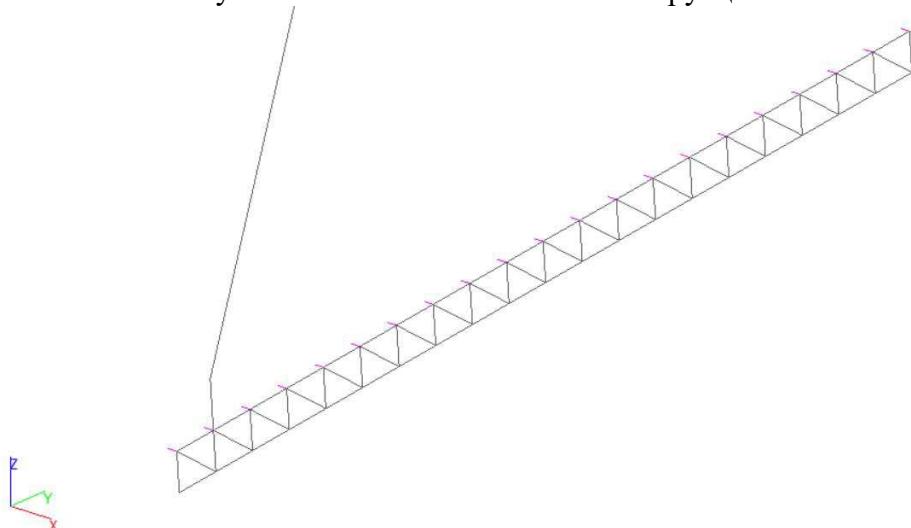


Рисунок 3.7 – Фрагмент расчетной схемы

Расчетная схема в ПК «ЛИРА 10» изображена на рисунках 3.8-3.9

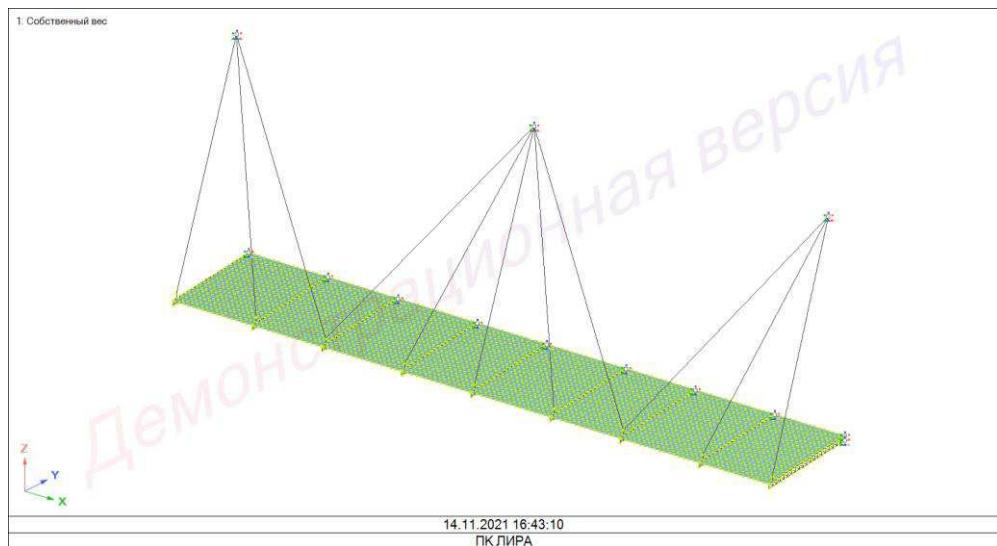


Рисунок 3.8 – Расчетная схема конструкции

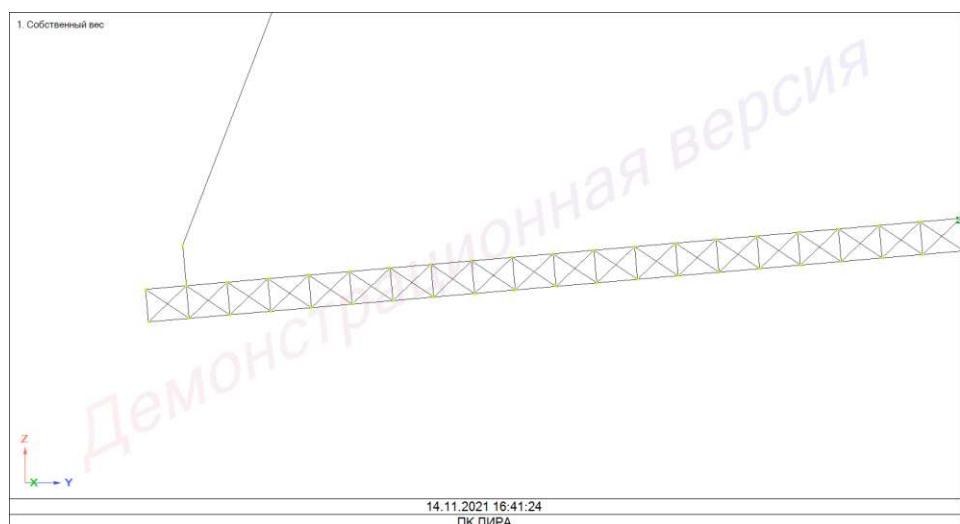


Рисунок 3.9 – Фрагмент расчетной схемы

Расчетная схема в ПК «Autodesk Robot Structural Analysis» изображена на рисунках 3.10-3.11

Рисунок 3.10 – Расчетная схема конструкции

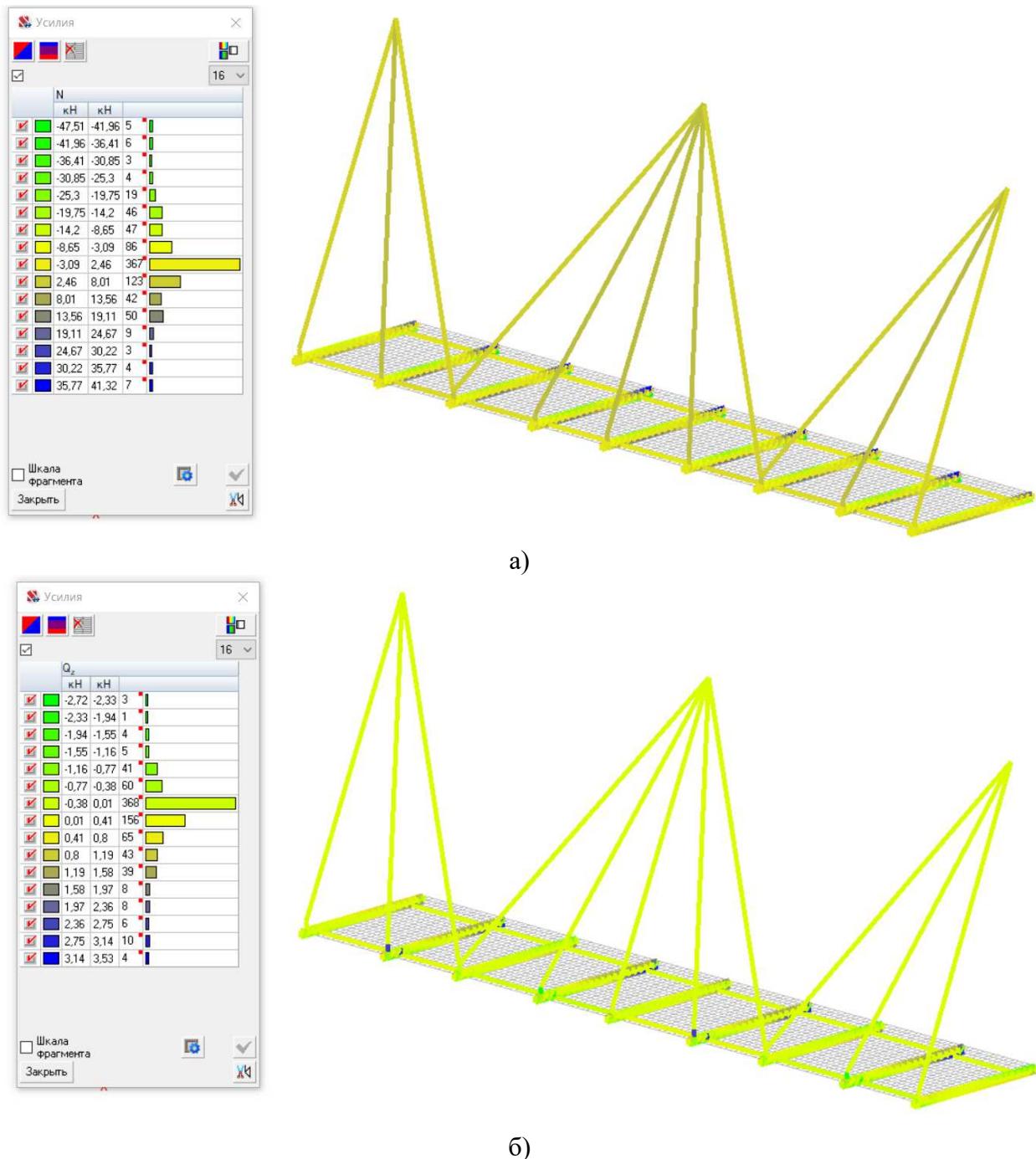
Рисунок 3.11 – Фрагмент расчетной схемы

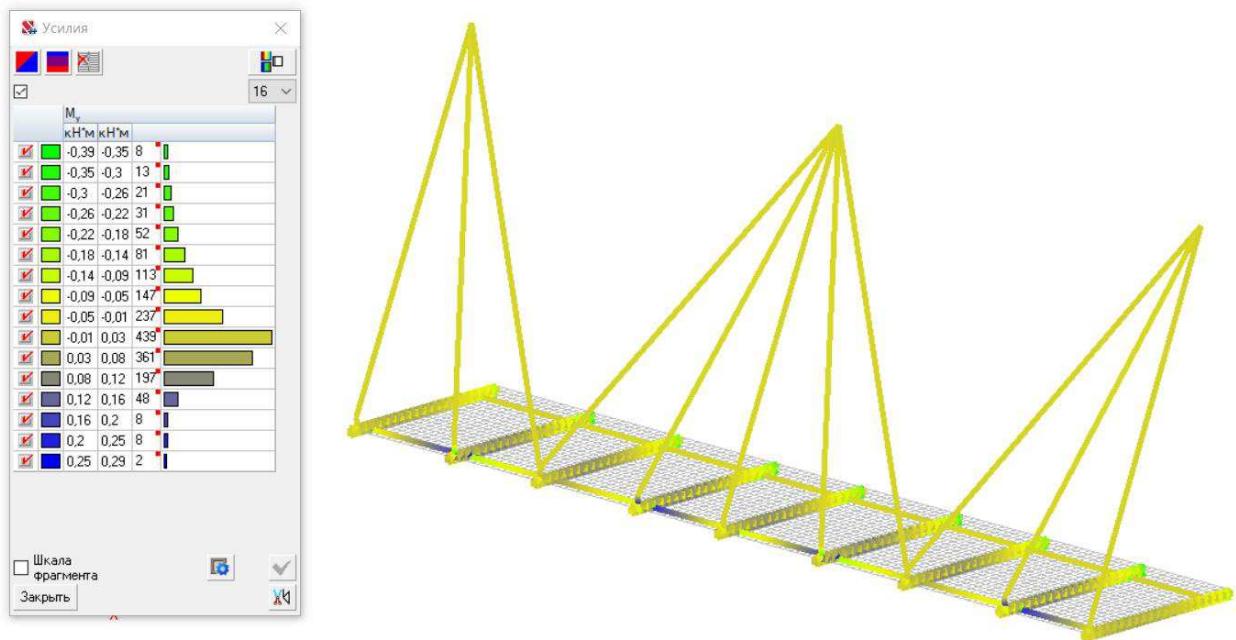
3.4.1 Статический расчет

Это допущение было принято посредством анализа работы уплотнительных элементов.

Уплотнительная резина, которая передает нагрузку на балки идеализирует действие шарнира, не запрещающему поворотное воздействие в месте примыкания балок со светопрозрачным заполнением.

Результаты расчета в ПК «SCAD» изображены на рисунке 3.12-3.13





в)

Рисунок 3.12 – Эпюры внутренних усилий
а) продольных N, кН.
б) поперечных Q, кН;
в) изгибающих моментов My, кН

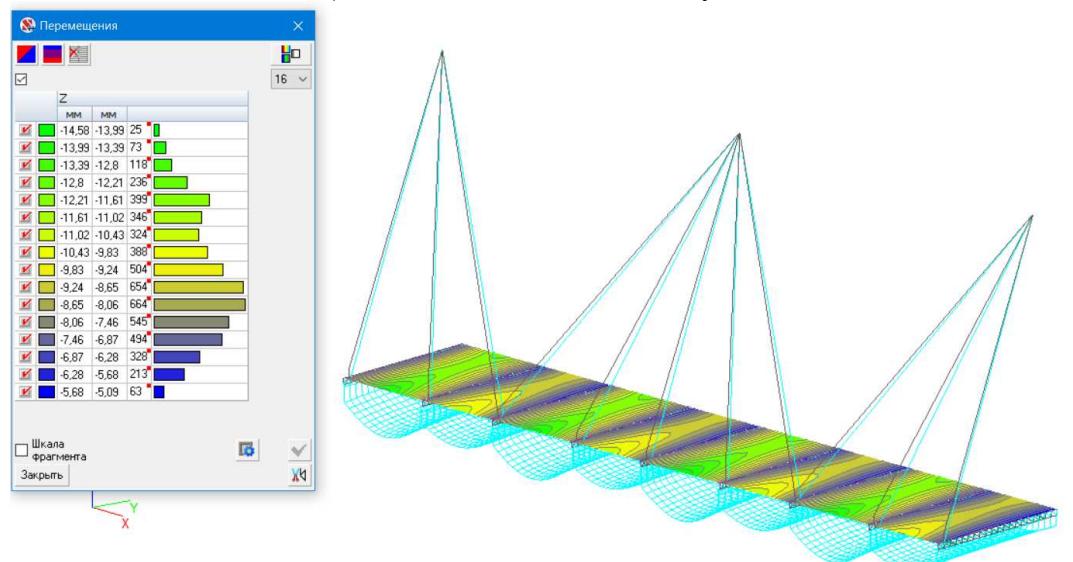


Рисунок 3.13 – Перемещения вдоль вертикальной оси z

Результаты расчета в ПК «ЛИРА10» изображены на рисунке 3.14-3.15

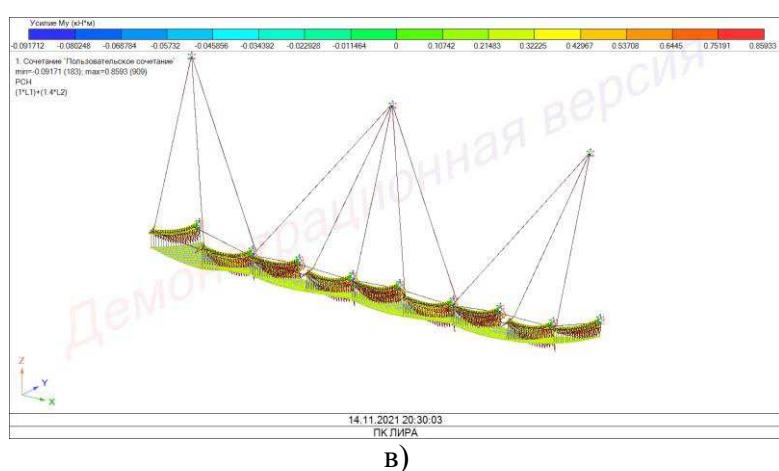
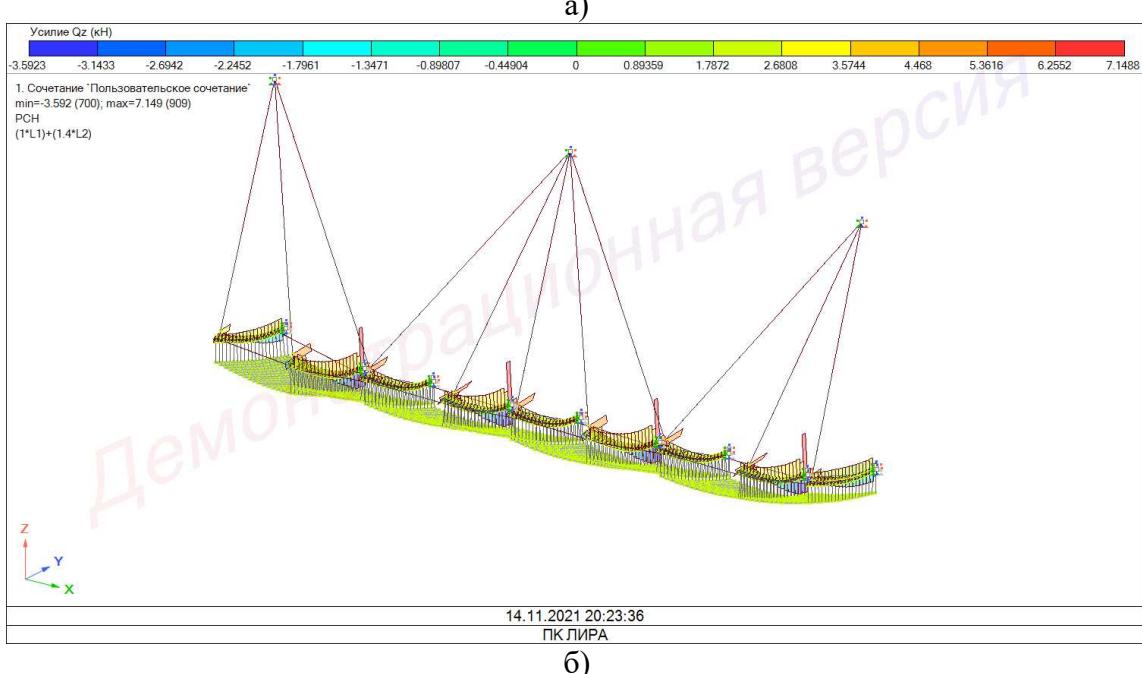
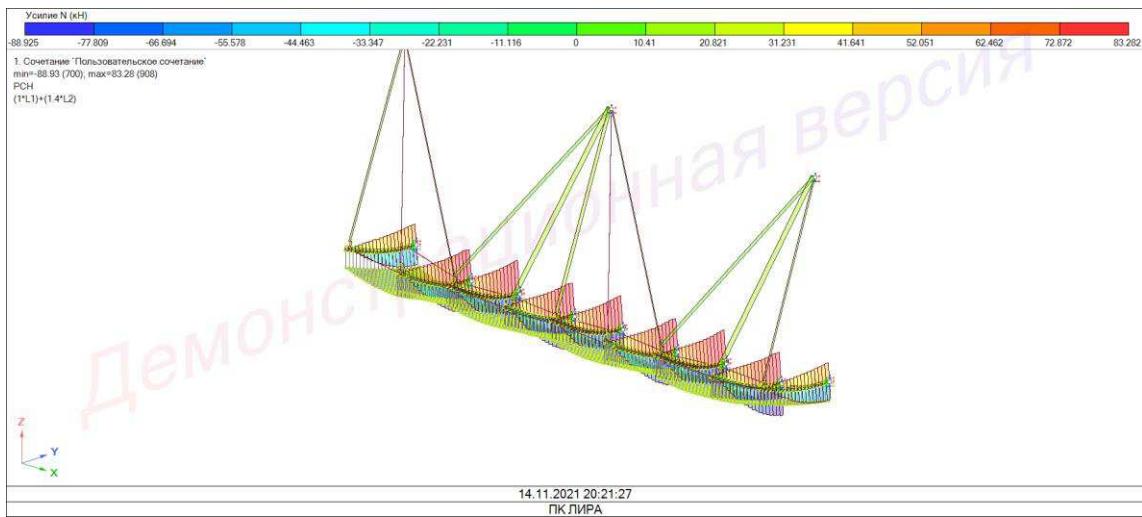


Рисунок 3.14 – Эпюры внутренних усилий

- а) продольных N, кН.
- б) поперечных Q, кН;
- в) изгибающих моментов My, кН

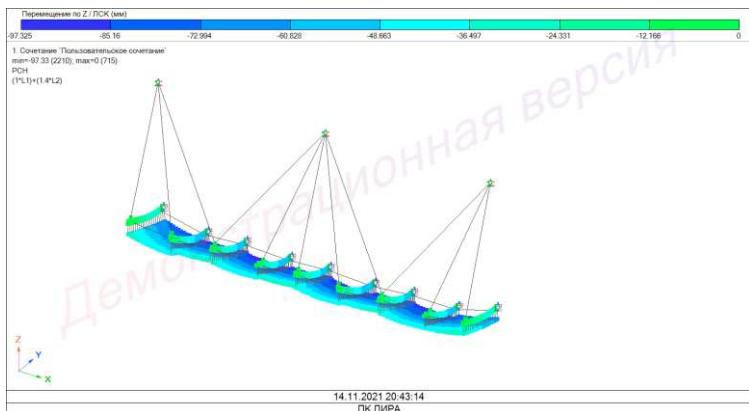


Рисунок 3.15 – Перемещения вдоль вертикальной оси z

Результаты расчета в ПК «Autodesk Robot Structural Analysis» изображены на рисунке 3.16-3.17

a)

б)

в)

Рисунок 3.16 – Эпюры внутренних усилий
а) продольных N , кН.
б) поперечных Q , кН;
в) изгибающих моментов M_y , кН

Рисунок 3.17 – Перемещения вдоль вертикальной оси z

3.5 Анализ результатов, по полученным перемещениям и усилиям в конструкции

По полученным результатам, часть которых изображена на рисунках 3.12-3.17 составим таблицу 3.8, в которой отобразим максимальные перемещения, возникающие в конструкции.

Таблица 3.8 – Перемещение крайних узлов δ , мм, в местах крепления поперечных балок при действии нагрузок, при различных вариантах закрепления

Вариант закрепления	Способ нагружения					
	Статическое		Ветровое		Расчетное сочетание	
Линейное перемещение	Поворот	Линейное перемещение	Поворот	Линейное перемещение	Поворот	
Жесткое сопряжение	-4,03	0,012	14,03	0,05	-17,54	0,07

Шарнирное сопряжение	-1,64	0	10,01	0	-11,2	0
----------------------	-------	---	-------	---	-------	---

Шарнирное закрепление в таблице 1 было принято с допущением, что уплотнительные резиновые элементы не будут ограничивать моментные составляющие. За статическое нагружение принимается Собственный вес конструкции, а также вес сугревого покрова, согласно III сугревому району, ветровое нагружение принималось в виде трапециевидной распределенной нагрузки соответствующей III ветровому району (с учетом действия пульсационной ветровой составляющей), за расчетное сочетание принималось действие наиболее неблагоприятного сочетания нагрузок, а именно: собственный вес принимался с коэффициентом равным 1 (единице), ветровая нагрузка с коэффициентом равным 0,9, а сугревая нагрузка не учитывалась вовсе.

Также было проанализировано перемещение улов вант при действии знакопеременной ветровой нагрузки. В таблице 3.9 отображены значения перемещений крайних консольных узлов крепления вант.

Таблица 3.9. Перемещение крайних узлов δ , мм, в местах крепления вант при действии расчетных нагрузок

Линейное узловое перемещение	
Ветровое нагружение по схеме №3	Ветровое нагружение по схеме №4
10,01	-6,4

3.6 Вывод по главе 3

Рассчитав конструкцию с двумя разными расчетными схемами, сделаем несколько выводов:

1 Допущение о шарнирном сопряжении поперечных балок к светопрозрачному заполнению более чем приемлемо, т.к при такой расчетной схеме наиболее рационально выглядит эпюра моментов. Т.е уже можно

говорить о более рациональном работе конструкций без уточненного конструктивного расчета.

2 При требуемом загружении пиковой ветровой нагрузке и при задании его направления снизу согласно [3, прил.5, рис. 1] на консольных узлах вантовой конструкции возникают сжимающие усилия, что недопустимо при работе абсолютно-упругих вант, запроектированных и эксплуатируемых в виде стального тросевидного каната.

3. В связи с вышеуказанным выводом необходимо конструктивное изменение, благодаря которому целиком вся конструкция будет работать наиболее рационально.

Глава 4 Конструктивный расчет

4.1 Исследование и анализ использование конструкций на действие статического ветрового нагружения при помощи ANSYS

Для изображения общей напряженной картины конструкции в данной части мы создадим трехмерную конструкцию в Autodesk Revit.

BIM-модель конструкции изображена на рисунке 4.1

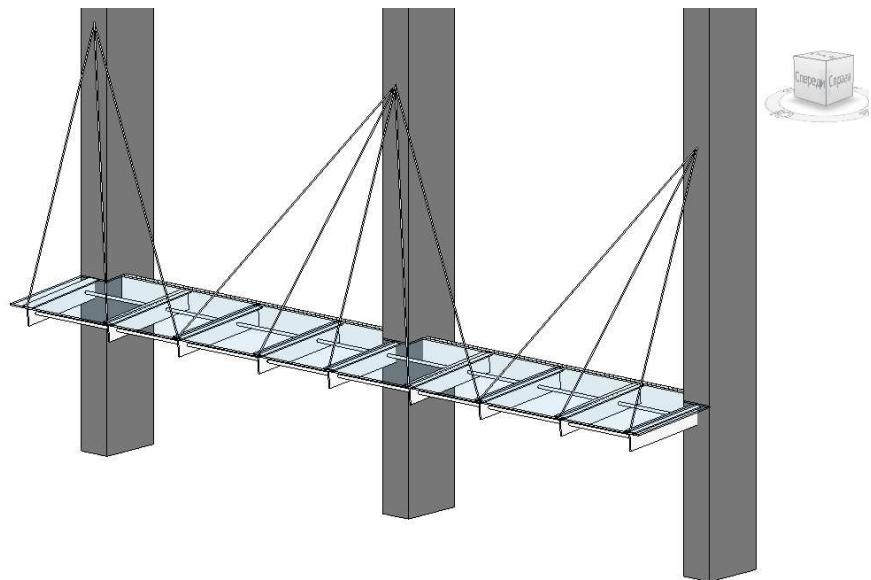


Рисунок 4.1 - BIM-модель конструкции

Модель из Autodesk Revit была конвертирована в формат SAT, который поддерживает SpaceClaim и рассчитана в ПК «Ansys»

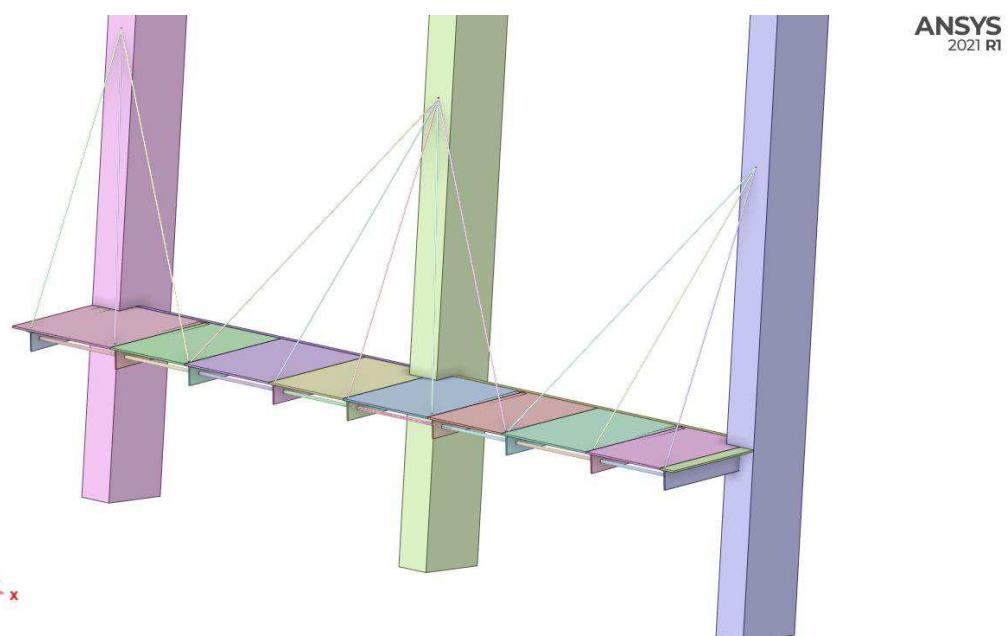


Рисунок 4.2 - Геометрия модели в SpaceClaim

На рисунке 4.3 изображена расчетная модель в ПК «Ansys»

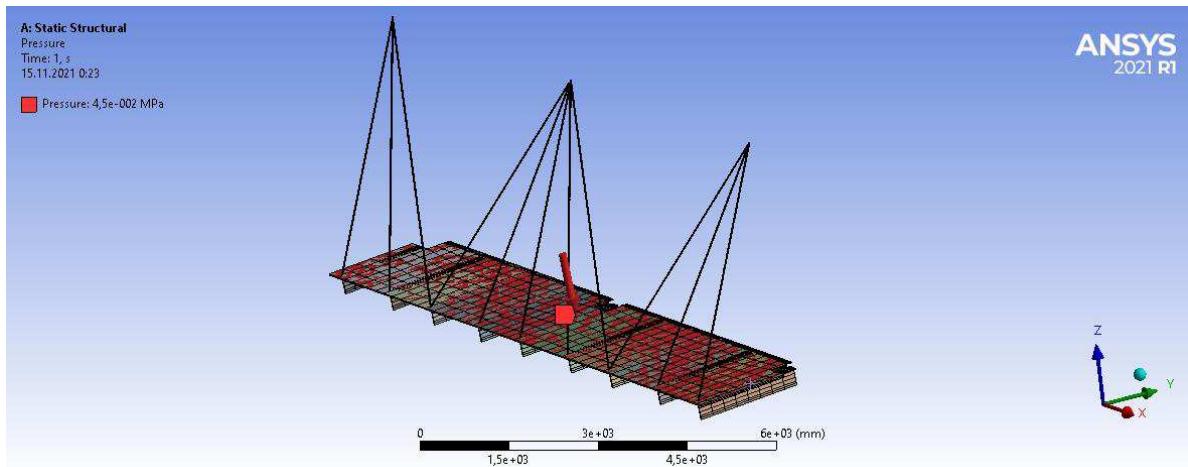


Рисунок 4.3 - Расчетная модель в ПК «Ansys»

4.2 Анализ полученных данных

Согласно данным полученным результатам.

Напряжения, возникшие в стальных конструкции находятся в упругой работе. Они не превысили предела в 240 МПа. Но как и предполагалось и подтверждалось двумерными программными комплексами при возникновении ветровой нагрузке, соответствующей схеме нагружения №3, перемещения консольных узлов больше предельных

Также к сказанному ранее, ванты при действии ветровой нагрузки, уже предварительно натянутые для работы на растяжение в данном случае не работают.

4.3 Конструктивный анализ использования уже введенных в эксплуатацию конструкций и анализ целесообразности их использования

Согласно исходным данным в эксплуатируемой конструкции приняты следующие конструктивные элементы:

Ванты выполнены в виде канатных металлических тросов длиной в натяженном состоянии 5400-4430 мм в зависимости от их расположения;

Балки, соединяющие вдоль длины здания между железобетонными колоннами, запроектированы в виде стального квадратного профиля 160x5.

Поперечные балки выполнены из стального прокатного таврового профиля 190x50x10 длиной 2000 мм с устройством декоративной треугольной перфорацией;

Продольные балки выполнены из прокатного трубчатого стального профиля 50x4 и уложены вдоль всей длины конструкции.

Покрытие – стекло триплекс толщиной – 25,52 мм (3-ех слойное: 1 слой – закаленное прозрачное стекло Optiwhite толщиной 12 мм, 2 слой – склеивающая армированная пленка SentryGlas 1.52 мм, 3 слой – закаленное прозрачное стекло Optiwhite толщиной 12 мм).

В связи с утверждениями выдвинутыми в пункте 4.2 необходимо переконструирование конструкции вантового светопрозрачного навеса. Исключая возможность полного демонтажа конструкции прибегаем к следующим изменениям:

1 Ванты запроектированные в виде канатных металлических тросов оставляем в своем прежнем состоянии;

2 Балки между колоннами запроектированные в виде стального квадратного профиля 160x5 оставляем без изменения;

3 Поперечные несущие жестко-защемленные консольные балки запроектированные из прокатного таврового профиля 190x50x10 оставляем в своем прежнем состоянии;

4 Продольные балки запроектированные в виде трубчатого стального профиля 50x4 оставляем без изменений;

5 Покрытие в виде безопасного многослойного стекла оставляем без изменений;

6 Вводим дополнительный элемент, который будет воспрепятствовать возникновению предельных допустимых перемещений, посредством которых конструкция не соответствует требованиям проектирования по II группе предельных состояний для стальных конструкций. Этот элемент проектируем

в виде оттяжек, той же жесткости что и имеющиеся вантовые трассы, но расположенные ниже конструкции. Эти оттяжки крепим к железобетонным колоннам с шагом 6 м одним концом посредством закладной детали, другим же крепим его к стенке тавра 190x50x10 под креплением верхних вант через болт M22..

Конструктивные решения светопрозрачного консольно-вантового навеса представлены в графической части.

4.4 Вывод на главе 4

1 Как и в предыдущей главе в результатах статического расчета подтвердилось возникновение перемещений при нагружении ветровой нагрузки снизу, что говорит о правильности расчетов;

2 Было принято конструктивное решение, благодаря которому конструкция будет эффективно работать и не потребует полного демонтажа «не работающих» вант. Решение следующее: ввести в работу конструкции оттяжки прикрепленные к узлам, расположенным у консольного края тавровой балки, посредством которых перемещение в вертикальном направлении этих узлов невозможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие тенденции использования светопрозрачных конструкций, развиваются и требования к ним. Но не смотря на возвышающийся темп требований к проектированию согласно действующим нормам ошибки в них неизбежны и порой эти ошибки дорого цепятся в будущем.

В связи с этим в первой главе магистерской диссертации изучены и проанализированы примеры вантовых конструкций, история их зарождения, методики расчета, применяемые в наши дни.

Во второй главе, описана наиболее острая проблема расчета ветровой нагрузки, было сделано общее представление о ветре, в свою очередь, учет которого является очень важным фактором и который стоит учитывать на всех стадиях проектирования и строительства зданий и сооружений. Были рассмотрены нормативные документы, которые обязуют выполнять расчеты конструкций на пиковую составляющую ветровую нагрузку при проектирование навесов, что не наблюдалось в действующих проектах, прошедших экспертное заключение.

В третьей главе был совершен статический расчет конструкции в нескольких программных комплексах, в расчетных схемах которых принималось допущение о шарнирном сопряжении поперечных балок к светопрозрачному заполнению, которое позволяло говорить о более рациональной работе конструкции без уточненного конструктивного расчета. Также по результатам расчетов было выяснено, что при требуемом загружении пиковой ветровой нагрузке и при задании его направления «снизу» на консольных узлах вантовой конструкции возникают сжимающие усилия, что недопустимо при работе абсолютно-упругих вант, запроектированных и эксплуатируемых в виде стального тросевидного каната. И поэтому было принято решение о конструктивном изменении, благодаря которому целиком вся конструкция будет работать наиболее рационально.

В четвертой главе, как и в предыдущей главе в результатах статического расчета подтвердилось возникновение перемещений при нагружении ветровой нагрузки снизу при выполнение расчета в ПК «Ansys». Помимо этого было принято конструктивное решение, благодаря которому конструкция будет эффективно работать и не потребует полного демонтажа «не работающих» вант. Решение следующее: ввести в работу конструкции оттяжки прикрепленные к узлам, расположенным у консольного края тавровой балки, посредством которых перемещение в вертикальном направлении этих узлов невозможно.

По результатам диссертационного исследования по теме «Расчет напряженно-деформируемого состояния светопрозрачного козырька на примере международного аэропорта Красноярск» в полном объеме выполнены следующие задачи:

- 1 Изучена и проанализирована работа и расчеты вант, вантовых козырьков согласно действующим нормативным документам;
- 2 Изучено действие ветровой нагрузки для протяженных в длину навесов согласно действующим нормам проектирования;
- 3 Выполнен статический расчет конструкции в программных комплексах SCAD Office, Лира 10, Autodesk Robot Structure, сравнив и проанализировав полученные результаты и сделан вывод об эффективности вида закрепления вант;
- 4 Исследовано напряженно-деформированное состояние фрагмента конструкции при помощи программного комплекса «Ansys», с целью определения эффективности работы и целесообразности ныне запроектируемой и эксплуатируемой конструкции, а также выполнен конструктивный расчет.

Достигнута цель диссертационного исследования, согласно выдвинутой гипотезе исследования.

Выполнение рабочего расчета светопрозрачного навеса в диссертационной работе позволит, как подрядным компаниям, так и

проектным институтам строительной отрасли проектировать эффективные и рациональные конструкции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Градостроительный кодекс Российской Федерации. Федеральный закон от 29.12.2004 г. № 190-ФЗ. – М.: Юрайт-Издат, 2016. – 83 с.
- 2 СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – Взамен СП 16.13330.2017; введ. 28.08.2017.' – М.:ОАО ЦПП, 2017. – 142 с.
- 3 СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями N 1, 2). введ. 01.01.2013. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 146 с.
- 4 СП 131.13330.2018 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. Введ. 09.05.2019 г. – М.: ФАУ ФЦС, 2016. – 125 с.
- 5 СП 17.13330.2011 Кровли. Актуализированная редакция СНиП II-26. – Взамен СП 17.13330.2010; введ. 20.05.2011. – М.: ОАО ЦПП, 2010. – 74 с.
- 6 СП 118.13330.2012 Общественные здания и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 31-06-2009 – Взамен СП 118.13330.2010; введ. 09.01.2014. – М.:ОАО ЦПП, 2014. – 153 с.
- 7 ГОСТ 21.501 – 2011 Правила выполнения рабочей документации архитектурных и конструктивных решений. – Взамен ГОСТ 21.501 – 93; введ. с 1.05.2013. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 45с
- 8 ГОСТ 5949-75 Сталь сортовая и калиброванная коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия ; введ. с 01.01.1975. – Москва: Стандартинформ, 2003. – 33с
- 9 Канат двойной свивки типа лк-р конструкции 6x19 (1+6+6/6). Сортамент – Взамен ГОСТ 2688-69; введ. 01.01.1982 – Москва: Стандартинформ, 2001. – 8с
- 10 ГОСТ 111-2014 Стекло листовое бесцветное. Технические условия; введ. 04.01.2016. – М.:ОАО ЦПП, 2011. – 21 с.

- 11 ГОСТ 30826-2014 Стекло многослойное. Технические условия; введ. 04.01.2016. – М.:ОАО ЦПП, 2011. – 37 с.
- 12 Кирсанов Н.М. Висячие и вантовые конструкции. М.: «Стройиздат», 1981. 156 с.
- 13 Каучурин В.К. Теория висячих систем. Статический расчет. Л.: Госстройиздат, 1962. 224 с
- 14 Федулов В.К., Суладзе М.Д., Артемова Л.Ю. Вантовые покрытия: учеб. пособие для вузов /. – М.: МАДИ. – М., 2014. – 48 с.
- 15 Кужахметова Э.Р. Методы расчета вант и вантовых конструкций / Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2019, №2 С39-47
- 16 Кужахметова Э.Р., Сапожников А.И. Архитектурная выразительность и физиологическая целесообразность зданий с криволинейными поверхностями // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. №11 (166). С. 42–45.
- 17 Кужахметова Э.Р. Деформация вант при различных условиях нагружения // Балтийский морской форум: материалы VI Международного Балтийского морского форума 2018 года: «Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении и строительстве»: IV Международная конференция, (Калининград, 3-6 сентября 2018). Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ».2018. Т. 6. С.129–140.
- 18 Пискун А.А. Ветровые нагрузки на сооружения Белорусский национальный технический университет – М.: МАДИ. – М., 2011. – 41 с.
- 19 Кривошапко С.Н. Висячие тросовые конструкции и покрытия сооружений Строительство уникальных зданий и сооружений. ISSN 2304-6295. 7 (34). 2015.С. 51-70
- 20 Галямичев А.В. Ветровая нагрузка и её действие на фасадные конструкции Строительство уникальных зданий и сооружений. ISSN 2304-6295. 9 (60). 2017. С.44-57

21 А.В. Галымичев Специфика определения нагрузок на ограждающие конструкции и её влияние на результаты их статического расчёта «Науковедение» ISSN 2223-Том 7, №2 (2015) С. 44-57

22 Захаров Артем Александрович Особенности статического расчета фасадных светопрозрачных конструкций // XVIII международная научно-практическая конференция | МЦНС «НАУКА И ПРОСВЕЩЕНИЕ» №2 (2020) С. 43-47

23 Кривошапко С.Н. Тентовая архитектура// Строительство и реконструкция. 2015. № 3 (59). С. 100-109.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт
институт

Кафедра строительных конструкций и управляемых систем
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

С.В. Деордиев
подпись
« ____ » 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Расчет напряженно-деформируемого состояния светопрозрачного козырька
на примере международного аэропорта Красноярск»
тема

08.04.01 «Строительство»
код и наименование направления

08.04.01.14 «Промышленное и гражданское строительство»
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель 
подпись, дата доцент, к.т.н. И.Н.Архипов
должность, ученая степень инициалы, фамилия

Выпускник 
подпись, дата С.М.Масловский
инициалы, фамилия

Рецензент 
подпись, дата доцент, к.т.н. Р.А.Сабиров
должность, ученая степень инициалы, фамилия

Красноярск 2021