

Научно-исследовательский центр СтаДиО

Свидетельство СРО «АПОЭК» - Ассоциации «Проектировщики оборонного и энергетического комплексов»
Номер решения о приеме в члены СРО № 06-ПСС-38/2018 от 20.06.2018 г.

123098, Москва, пл. акад. Курчатова, 1, т. (499)706-8810, e-mail: stadyo@stadyo.ru, Web-site: www.stadyo.ru

Инв. № МИ-2021-07/21-1

«Утверждаю»
Генеральный директор ЗАО НИИ СтаДиО

_____ **А.М.Белостоцкий**
“ ____ ” _____ 2021 г.

Научно-технический отчет
по договору № 11-МИ-07/21 от 05 августа 2021 года

**«Научно-техническое сопровождение проектирования
по объекту: «Театр оперы и балета (950 мест)» по адресу: Российская Федерация,
Калининградская область, г. Калининград, о. Октябрьский»**

\

Этап 1
**Комплексные аэродинамические исследования «Театра оперы и балета»
(г. Калининград) на основе численного решения трехмерных задач аэродинамики**

Руководители работы:
док. техн. наук, академик РААСН **А.М. Белостоцкий**
канд. тех. наук, **Д.С. Дмитриев**

Ответственный исполнитель:
О.С. Горячевский

Исполнитель Этапа 1:
Н.А. Бритиков

Москва, 2021

Свидетельство СРО «АПОЭК» - Ассоциации «Проектировщики оборонного и энергетического комплексов»
Номер решения о приеме в члены СРО № 06-ПСС-38/2018 от 20.06.2018 г.

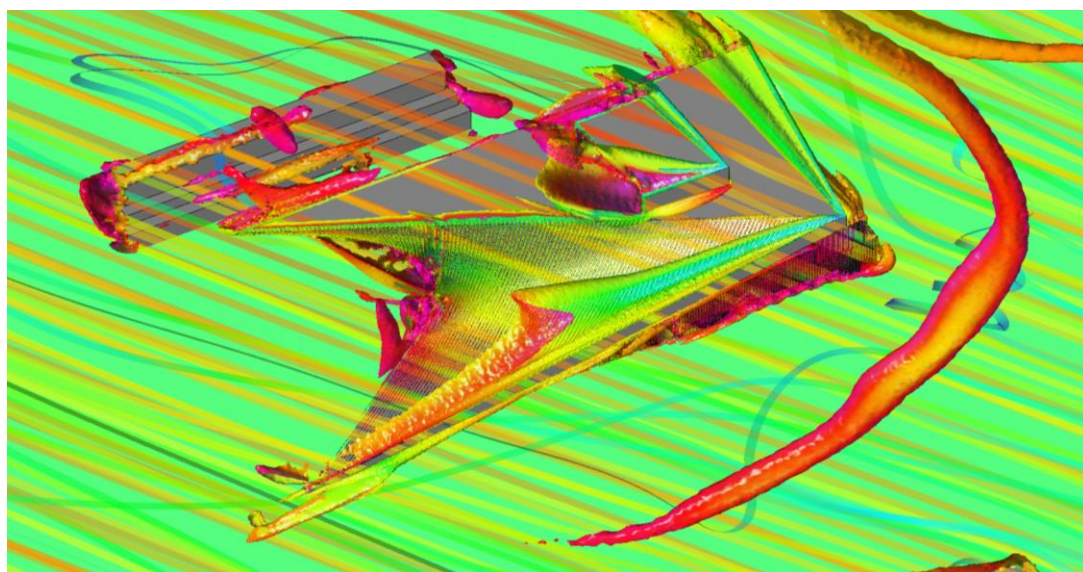
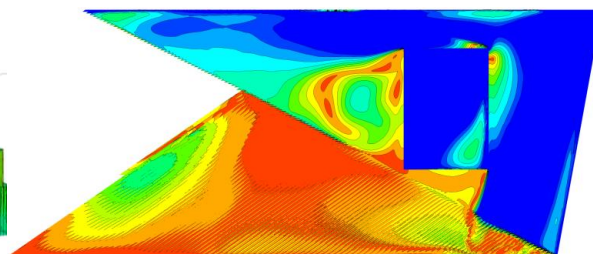
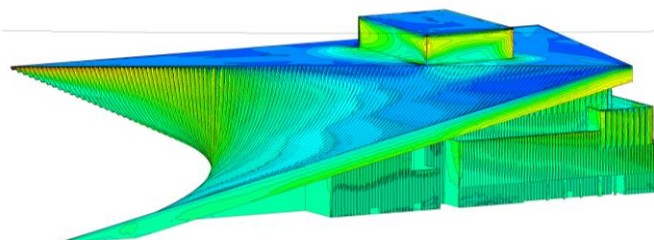
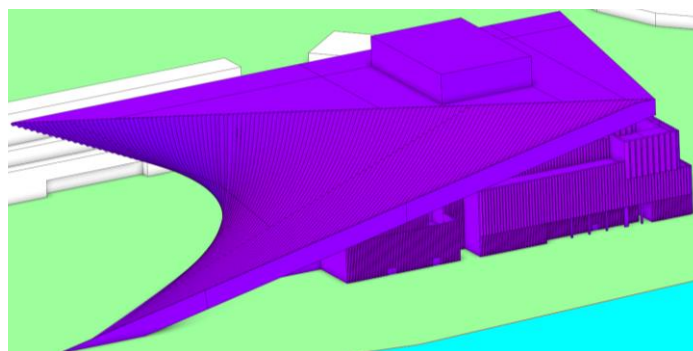
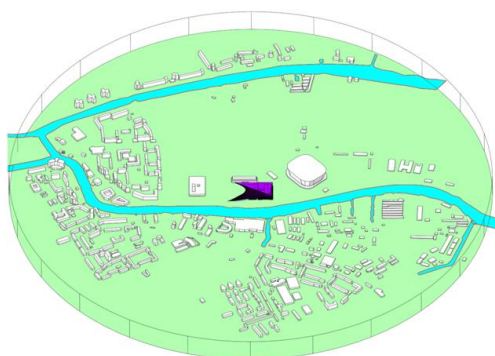
123098, Москва, пл. акад. Курчатова, 1, т. (499)706-8810, e-mail: stadyo@stadyo.ru, Web-site: www.stadyo.ru

Инв. № МИ-2021-07/21-1

Научно-технический отчет по договору № 11-МИ-07/21 от 05 августа 2021 года

Этап 1

**«Комплексные аэродинамические исследования по Объекту
«Театр оперы и балета» (г. Калининград) на основе численного решения
трехмерных задач аэродинамики»**



Список исполнителей

Руководители работы:

Ген. директор ЗАО НИЦ СтаДиО,
док. техн. наук, академик РААСН

А.М. Белостоцкий
(научное руководство, постановка задач,
анализ результатов, общее редактирование отчета)

Заведующий отделом расчетных
исследований, канд. техн. наук

Д.С. Дмитриев
(сбор и анализ технической документации,
постановка задач, общее редактирование отчета)

Ответственный исполнитель:

Ведущий инженер-расчетчик

О.С. Горячевский
(анализ тех. документации и нормативно-
методической литературы, постановка задач
расчетных исследований, разработка расчетных
моделей, анализ результатов, формирование
отчета)

Исполнитель:

Инженер-расчетчик

Н.А. Бритиков
(анализ тех. документации и нормативно-
методической литературы, разработка расчетных
моделей, анализ и представление результатов,
формирование отчета)

Исходные данные. Постановка задач

2.1 Площадка строительства, рельеф и застройка объекта

Земельный участок под строительство Театра оперы и балета (далее Объект) расположен на Парадной набережной Октябрьского острова в города Калининград. Территория строительства ограничена с севера территорией строительства Высшей школы музыкального и театрального искусства; с запада – территорией строительства филиала Третьяковской галереи, с востока – через проезд, стадионом «Калининград», с юга – набережной реки Старая Преголя.

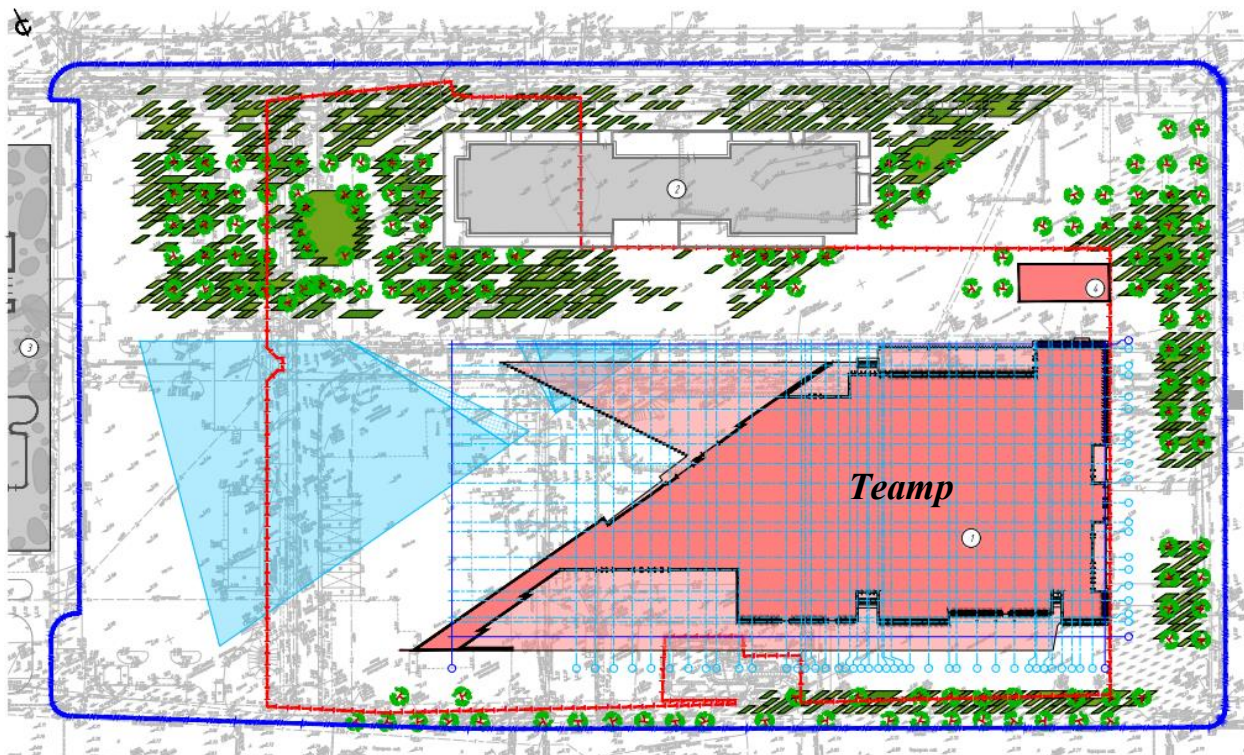


Рис. 0.1 Схема планировочной организации земельного участка



Рис. 0.2 Карта местности возле площадки строительства (<https://yandex.ru/maps>)

Согласно схематической карте климатического районирования (по СП 131.13330.2018 [15]) район строительства относится к II климатическому району, подрайону II-Б.

Климат переходный от умеренно-морского к умеренно континентальному. Среднегодовая температура воздуха $7,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Среднегодовой уровень осадков 750 мм.

Согласно СП 20.13330.2016 площадка строительства находится в **II ветровом районе** (нормативное значение ветрового давления $w_0 = 0.3\text{ кПа}$) и **II снеговом районе** (нормативное значение веса снегового покрова $S_g = 1.0\text{ кПа}$). При определении ветровых нагрузок следует принять тип местности В.

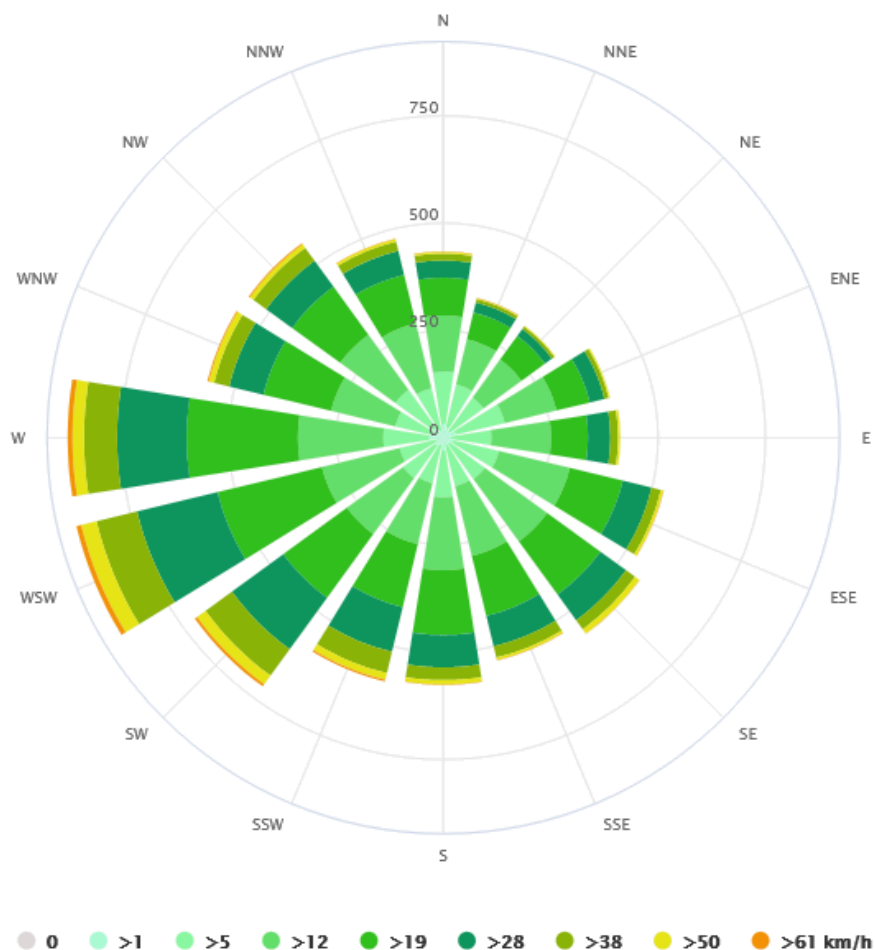


Рис. 0.3 Роза скоростей ветра для города Калининград,
(<https://www.meteoblue.com>)

2.2 Постановка задач расчетных исследований

В соответствии с техническим заданием [1] ставятся и решаются следующие задачи:

- 1) Анализ и обобщение проектной документации Объекта, постановка задач расчетных исследований.
- 2) Разработка и верификация трехмерных аэродинамических расчетных моделей Объекта с учетом рельефа местности, перспективной окружающей застройки и различных направлений ветра.
- 3) Выявление наиболее опасных и характерных направлений ветра на основе анализа суммарных ветровых нагрузок на несущие конструкции сооружений, полученных в результате численного моделирования.
- 4) Определение расчетных средних и пульсационных составляющих ветровой нагрузки на несущие конструкции для исследуемых направлений ветра.
- 5) Определение распределения пикового (минимального и максимального) ветрового давления на ограждающие конструкции Объекта.
- 6) Определение распределения снеговых нагрузок на конструкции покрытия Объекта на основе нормативных методик.

Методики определения ветрового и снегового нагружения зданий, сооружений и комплексов

3.1 Общие положения

3.1.1 Ветровое нагружение

Обзор существующих методик определения ветровых нагрузок на здания, сооружения и комплексы показал, что основными подходами к решению заявленной проблемы являются:

Инженерные нормативно-аналитические методики (например, СП [2-5], МДС [6], Eurocode [9], ASCE [11] и т.п.);

Экспериментальное моделирование (продувки моделей сооружений в аэродинамических трубах – АДТ);

Численное моделирование [21-26].

Следует отметить, что сложившиеся *нормативно-аналитические методики* были разработаны и уверенно применяются для зданий типовой формы, малой и средней высоты при разреженной застройке. Ныне действующая нормативная методика разработана в начале 70-х годов в ЦНИИСК им. Кучеренко с использованием работ Давенпорта (1962–1967) и была реализована в СНиП [3]. В 1978 году выпущено «Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра», подготовленное М.Ф. Барштейном [13]. В 1984 году издан справочник «Динамический расчет зданий и сооружений» под общей редакцией Б.Г. Коренева. В этом же году на русский язык была переведена книга Э. Симиу и Р. Сканлана «Воздействие ветра на здания и сооружения» [15].

При выпуске СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» выражения, описывающие динамическую реакцию сооружений при действии ветра, были заметно упрощены. В 2000 году Н.А. Попов разработал «Рекомендации по уточненному динамическому расчету зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки» [14]. В новой редакции СНиП [4] методика расчета ветровых нагрузок существенных изменений не претерпела. Разработанный СП 20.13330.2016 [2] утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. № 891/пр и введен в действие с 4 июня 2017 г (29 июля 2019 – введение последних изменений №2). В него включены ряд схем и положений Eurocode [9], но принципиальных отличий документ не содержит.

Дополнительные требования к определению и назначению ветровых нагрузок и аэродинамических коэффициентов на промышленные сооружения указаны в СП 43.13330.2012 и пособиях к нему.

Способы учета ветровых воздействий, которые могут возбуждать аэродинамически неустойчивые колебания типа галопирования, дивергенции и различных видов флаттера, приведены в отечественных [5] и европейских нормах [9].

Для сооружений сложных архитектурных форм и оригинальных конструктивных решений (а, тем более, их сравнительно компактных комплексов в относительно плотной застройке) действующие строительные нормы и правила (СНиПы) не содержат рекомендаций по назначению аэродинамических коэффициентов, в том числе, и для большинства высотных зданий, поэтому для зданий и сооружений такого типа необходимы более точные методики определения ветровых нагрузок, такие как численное и экспериментальное моделирование.

Экспериментальное моделирование в АДТ вызывает большой интерес в силу своей наглядности, доступности и возможности выполнения серии экспериментов в более короткие сроки. Главной проблемой для модельных испытаний является соблюдение полного подобия, что практически трудно реализуемо.

Для решения практических наукоемких задач исследования ветровой аэродинамики уникальных высотных, большепролетных зданий и сооружений и комплексов, в т.ч. в

условиях плотной городской застройки и сложного рельефа местности, основным и, по сути, безальтернативным сегодня подходом является *численное моделирование*. Существующие математические модели и численные методы позволяют напрямую смоделировать сложное трехмерное динамическое поведение воздушного потока с учетом различных направлений ветра, сложных конструктивно-архитектурных решений обтекаемого объекта и окружающей застройки. При этом их программная реализация находит себя как в исследовательских ПК (с открытым кодом), так и в универсальных коммерческих.

3.1.2 Снеговое нагружение

При проектировании производственных и общественных строительных комплексов требуется учитывать снеговую нагрузку, действующую на здания и сооружения. Неоднократные обрушения покрытий общественных, спортивных и производственных зданий (в том числе такие «резонансные», как СОК «Трансвааль-парк» и Басманный рынок в России, Театр «Аполло» в Великобритании, ряд большепролётных зданий за рубежом), вызванных решающим фактором снеговой нагрузки, привели к тому, что задача нормирования снеговых нагрузок на покрытия сооружений стала весьма актуальной. При заниженном значении снеговой нагрузки строительные конструкции обладают недостаточной прочностью, при завышенном значении происходит удорожание строительства. Следует также отметить многообразие форм, которые могут иметь различные здания и сооружения. Это и сооружения в форме параллелепипеда или совокупности параллелепипедов, пирамидальные и треугольные конструкции, и множество других возможных форм зданий и сооружений.



Рис. 3.1 Обрушение Басманного рынка



Рис. 3.2. Обрушение
СОК «Трансвааль-Парк»

Традиционно задача расчёта снеговых нагрузок решается с использованием аналитических формул, изложенных в [2-4], или изготовлением модели исследуемого сооружения и продувкой её в аэродинамической трубе. Однако расчёт снеговых нагрузок с помощью соотношений из [2-4] является общепризнанно неточным, приведены данные для ограниченного числа форм зданий и сооружений, отсутствует учёт влияния застройки. Более того, интенсивное развитие методов расчёта строительных конструкций привело к созданию новых оригинальных видов пространственных покрытий зданий, однако в нормах проектирования рекомендации по назначению снеговой нагрузки на новые виды пространственных покрытий отсутствуют.

Что касается испытаний в аэродинамических трубах, то здесь имеются ограничения на размеры продуваемого объекта, на скорость потока, снегоподобность используемого материала. Как правило, эксперимент в аэродинамической трубе моделирует перенос уже лежащего на покрытии снегоподобного материала под воздействием ветра. Очевидно, что в действительности явление снегопереноса сочетает в себе как перенос уже лежащего снега, так и нанос потоками ветра нового снега.

Аналитического решения для определения снеговых нагрузок на сегодняшний день не найдено.

В общестроительных отечественных [2-4] и европейских нормах [10] расчётное значение снеговой нагрузки на здания и сооружения предлагается определять по формулам вида

$$S_0 = c_e c_t \mu S_g ,$$

где α – коэффициент сочетания, c_e – коэффициент, учитывающий снос снега с покрытий зданий под действием ветра или иных факторов, c_t – термический коэффициент, μ – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие, S_g – вес снегового покрова на 1 м² горизонтальной поверхности земли. Отечественные и европейские нормы отличаются в этом вопросе только значениями коэффициентов в зависимости от географического расположения площадки строительства, формы здания, его расположения в застройке, ветрового режима местности и т.д.

Расчетные значения экстремальных снеговых нагрузок и особых снеговых нагрузок от падения снега указаны в отечественных [5] и европейских нормах [10].

Корректный учёт ветрового воздействия на снежный покров покрытий зданий – ещё одна недостаточно разработанная проблема. Формирование «снеговых мешков» на покрытиях зависит от геометрических характеристик здания, его положения относительно направления ветра, скорости ветра и интенсивности снегопада. Снег, падающий на пологое покрытие, в зависимости от скорости ветра частично или полностью сносится с крыши. На покрытиях пространственного типа снег с возвышенных участков сдувается в пониженные части покрытия, в так называемые снеговые мешки. Из-за накопления снега в снеговых мешках возможно обрушение покрытия. Учёт влияния ветра на образование снежного покрова особенно актуален, когда речь идёт о снеговых нагрузках, играющих значительную роль в расчёте прочности покрытий, особенно лёгких и/или большепролётных, которые получили широкое распространение в строительной практике в последние годы [42]. В целом нужно сказать, что характер перераспределения снега ветром по покрытию очень сложен. Поэтому нормативные рекомендации применимы только для определенных форм покрытий и конкретных местных климатических условий.

Определённые трудности возникают также при учёте снижения снеговой нагрузки вследствие воздействия температуры. Снеговые нагрузки на покрытия отапливаемых и неотапливаемых зданий могут отличаться в 3-4 раза. При описании процесса таяния снега на покрытиях большое значение имеют исследования теплопроводных свойств снежного покрова. Учёт этого фактора на данном этапе вызывает объективные сложности. Главная проблема заключается в корректном описании потока тепла через снежный покров, лежащий на покрытии здания. Для этого обычно используется уравнение теплопроводности Фурье. Коэффициент теплопроводности λ , который входит в это уравнение, определяется по опытным данным. При этом следует отметить большой разброс экспериментальных значений коэффициента λ для снега, что также вносит известные трудности при расчёте снеговой нагрузки.

Подход к изучению временных нагрузок с использованием теории нормальных стационарных случайных процессов предложен в трудах советского учёного В.В. Болотина [30] и развит представителями его школы. Данный подход базируется на доступной статистической информации о снеговой нагрузке, привязанной к тому или иному климатическому району. С другой стороны, известно, что большинство исследований по снеговым нагрузкам производилось в районах с умеренным климатом. Однако, например, в условиях более низких температур процесс формирования снежного покрова имеет ряд специфических особенностей, поэтому перенос результатов исследований, проведённых в европейской части страны, на северные территории недостаточно правомочен. Длительные натурные наблюдения в Якутии, проведённые на покрытиях зданий, выявили существенные отличия фактических снеговых нагрузок от нагрузок, определяемых по [4]. Свыше 60% территории Якутии не соответствуют по уровню снеговой нагрузки карте

районирования. Разница в значениях веса снегового покрова земли для отдельных населенных пунктов достигает почти тройного значения.

Кроме того, при расчёте накопления снега на грунте с использованием статистического подхода существует проблема корректного описания выборки максимальных снеговых нагрузок. В зарубежных строительных нормах предполагают, что выборки максимальных снеговых нагрузок адекватно описываются распределением вероятностей Гумбеля и вычисляют уровень x , который превышает весом снега в среднем один раз в течение T зим, однако в других работах делается вывод, что этот подход даёт завышенные значения снеговой нагрузки.

Накопление снега – случайный процесс. В течение зимы снеговая нагрузка на покрытие здания принимает неизвестные заранее значения, т. е. является случайной величиной. При этом высота снежного покрова на горизонтальной поверхности, полученная в результате статистической обработки многолетних наблюдений и заложенная в нормах (например [2-4]), предполагается известной. Если принять за данность количество выпадающего снега, то воздействие ветра на формирования снежного покрова является одним из основных, а во многих случаях и главным фактором, влияющим на снеговую нагрузку.

Определение расчетных ветровых нагрузок

5.1 Форма представления и номенклатура результатов расчета ветровых нагрузок

В данном разделе приведены основные результаты выполненных расчетных исследований по определению ветровых нагрузок на несущие и ограждающие (фасадные) конструкции Объекта. Многовариантные расчетные исследования проводились с учетом локального рельефа местности и окружающей застройки.

Система координат сооружения и расчетные направления ветрового потока показаны на рис. 5.1.

Начало координат находится приблизительно в геометрическом центре плана Объекта на отметке 0 м). Ось X ориентирована с З на В со сдвигом на 27° против часовой стрелки, ось Y – с Ю на С со сдвигом на 27° против часовой стрелки, ось Z – вверх. Угол атаки ветра (Угол, °) отсчитывается от Севера по часовой стрелке.

Схемы нумерации поверхностей сбора аэродинамических нагрузок (далее компоненты) приведены на рис. 5.2–5.12. Компоненты представляют собой наборы поверхностей, по которым производится интегрирование ветровых давлений и кинетической энергии турбулентности.

Средняя составляющая ветрового давления и средние скорости получены в результате стационарных расчетов, пульсационная составляющая, максимальные и минимальные значения ветрового давления вычислялись по численной методике, представленной в разделе (п. 3.4) данного отчета.

Положительному значению ветровых нагрузок соответствует направление, сонаправленное соответствующей координатной оси, а отрицательному – противоположно направленное соответствующей оси. Положительному значению ветровых нагрузок в форме давлений соответствует напор, а отрицательному – отсос.

Ветровые нагрузки на ламели гиперболического покрытия представлены в табл. 5.5, 5.7, 5.9, 5.11 в виде интегральной нагрузки на всю площадь соответствующей компоненты. Рекомендуется в прочностных расчетах прикладывать равномерно распределенную ветровую нагрузку на несущие конструкции ферм по формулам $q_x = \Phi_x / l$, $q_y = \Phi_y / l$, $q_z = \Phi_z / l$, где l – суммарная длина поясов ферм, воспринимающих ветровую нагрузку, находящихся в зонах соответствующих компонент (см. рис. 5.7, 5.8).

Все приведенные в главе значения ветровых нагрузок являются *расчетными* (с учетом коэффициента надежности по нагрузке $\gamma_f = 1.4$).

Полученные результаты представлены в следующем виде:

5.1.1 Ветровые нагрузки на *несущие* конструкции:

- средние суммарные ветровые нагрузки на несущие конструкции Театра в упомянутых выше осях (F_x , F_y , тс), векторная сумма нагрузки (F_R , кН) и суммарная вертикальная сила (F_z , тс) для 24-х направлений (шаг по углу 15°) с учетом и без учета окружающей застройки представлены в табличном виде (табл. 5.1-5.3) и в форме графиков (рис. 5.13-5.16);

- средняя (P , Па) и пульсационная (P_{puls} , Па) составляющие ветрового давления, суммарное ветровое давление (P_{sum} , Па) для соответствующих компонент (поверхность сбора аэродинамической нагрузки) в табличном виде (табл. 5.4, 5.6, 5.8, 5.10, 5.11).

5.1.2 Ветровые нагрузки на *ограждающие (фасадные)* конструкции:

- огибающие максимального и минимального значений давления на ограждающие (фасадные) конструкции Театра для всех направлений ветра (рис. 5.17, табл. 5.13);

- изополя верхней огибающей максимальных значений ветрового давления, нижней огибающей минимальных значений ветрового давления и соответствующих углов атаки ветра, при которых реализуются эти огибающие, представлены в графическом виде на рис. 5.18-5.33.

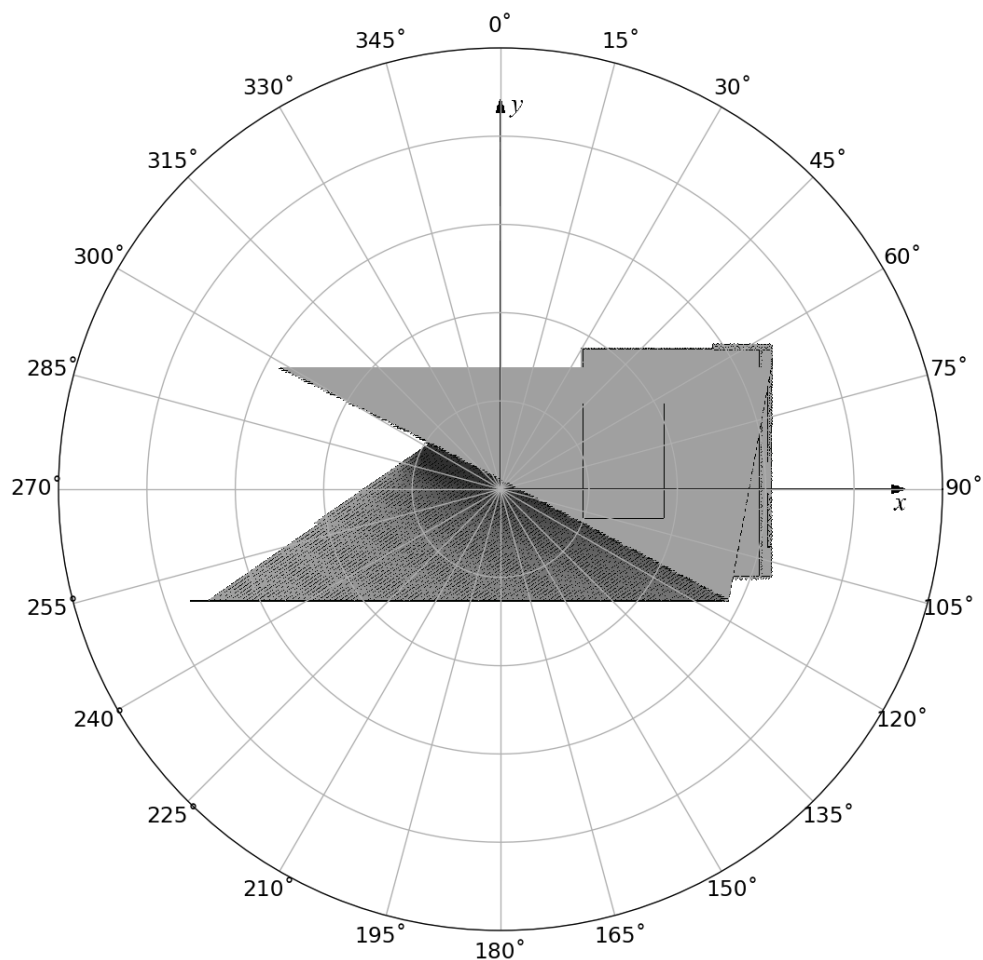


Рис. 0.1 Система координат и расчетные направления ветрового потока.

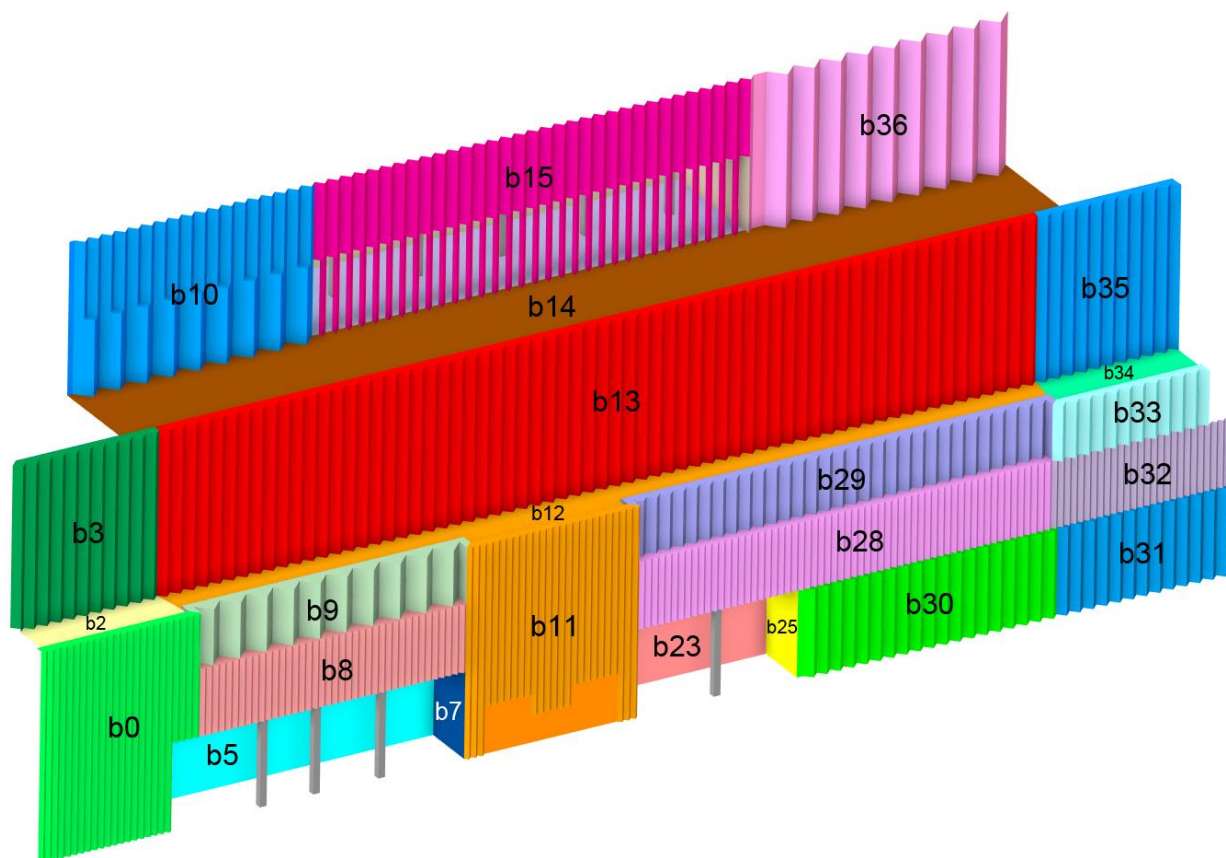


Рис. 0.2 Схема компонент *восточной стороны Театра* для сбора аэродинамических нагрузок. Вид сверху

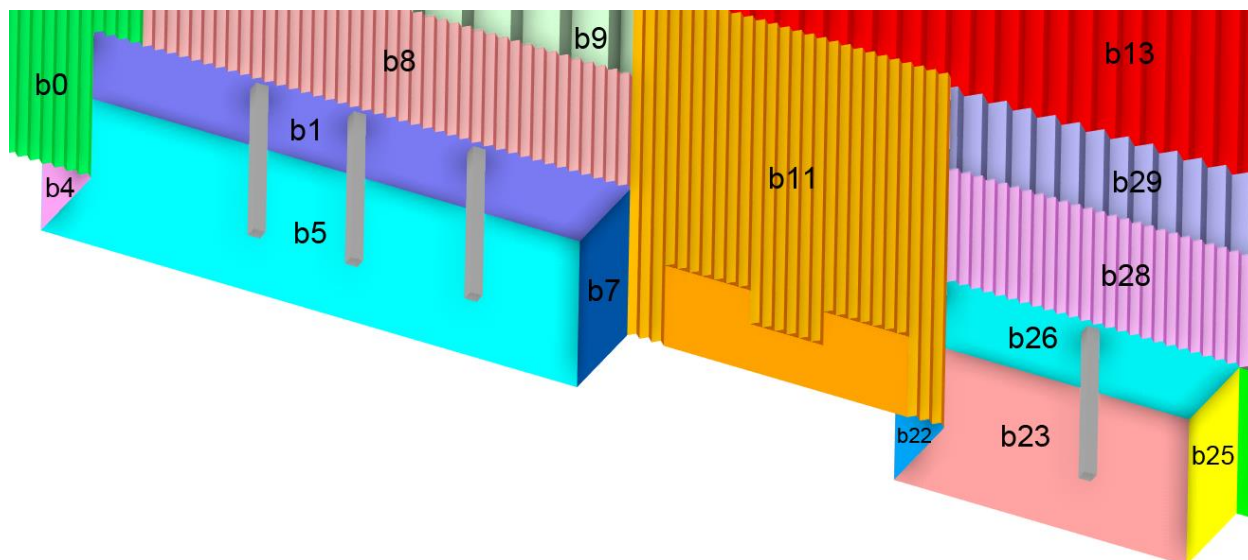


Рис. 0.3 Схема компонент восточной стороны Театра для сбора аэродинамических нагрузок. Вид снизу

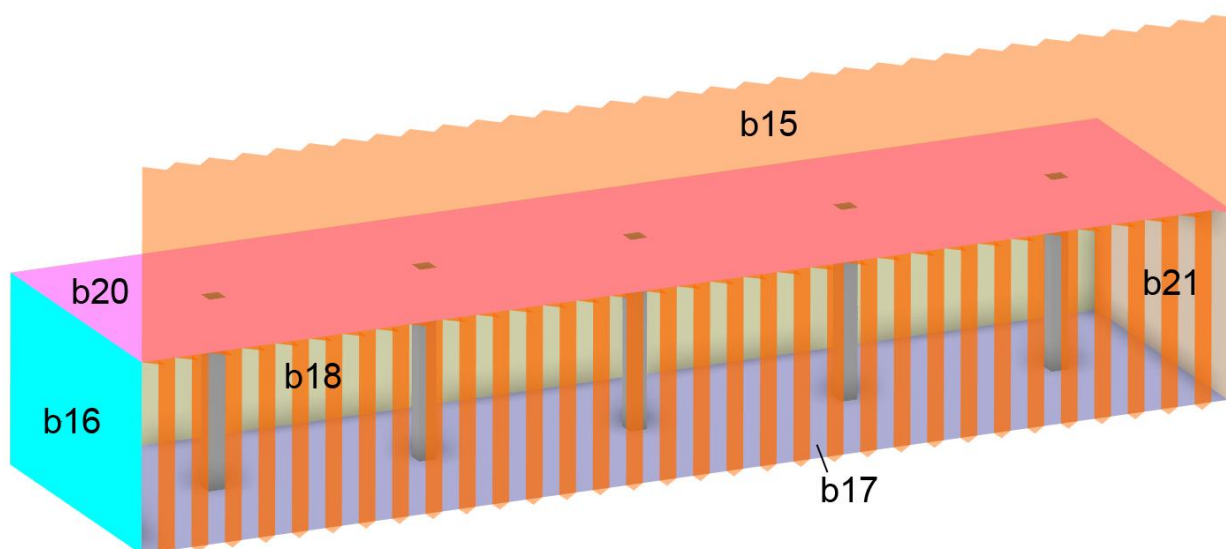


Рис. 0.4 Схема компонент восточной стороны Театра для сбора аэродинамических нагрузок. Вид на помещение для вентиляционного оборудования

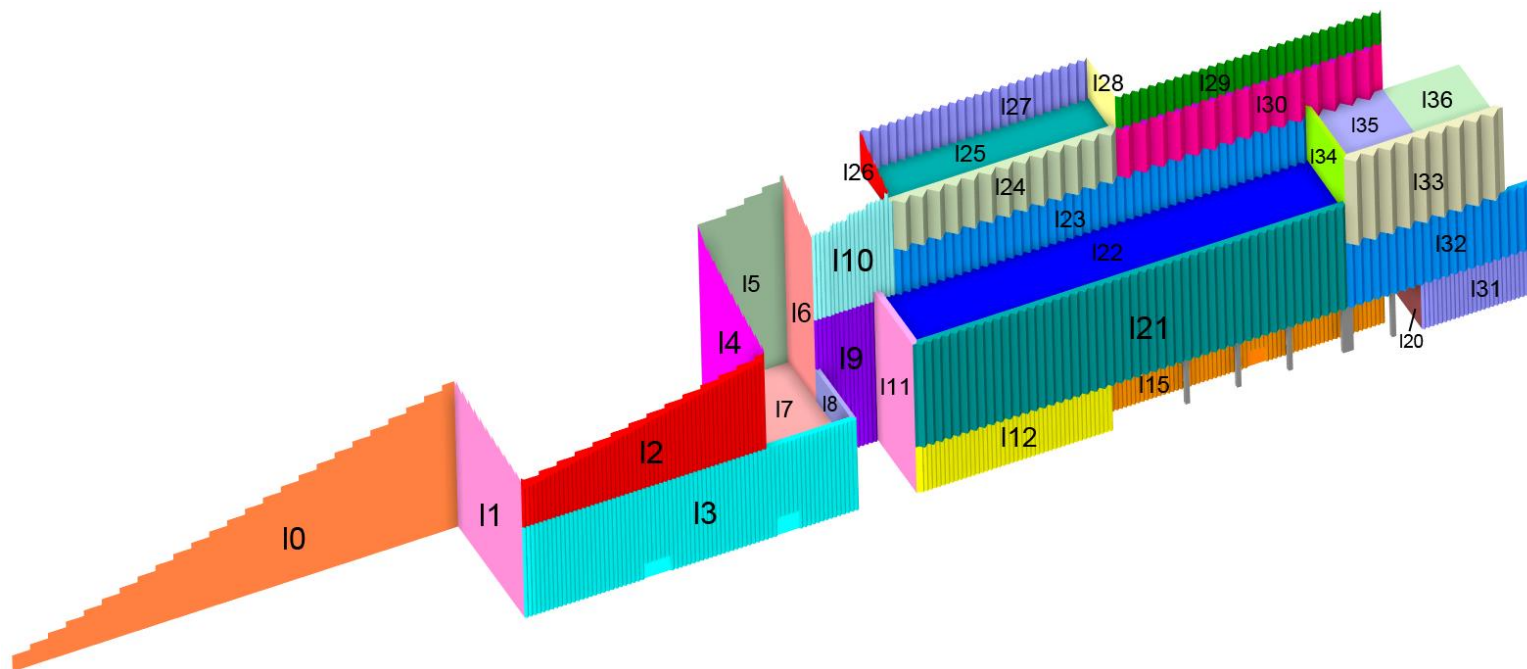


Рис. 0.5 Схема компонент южной стороны Театра для сбора аэродинамических нагрузок. Вид сверху

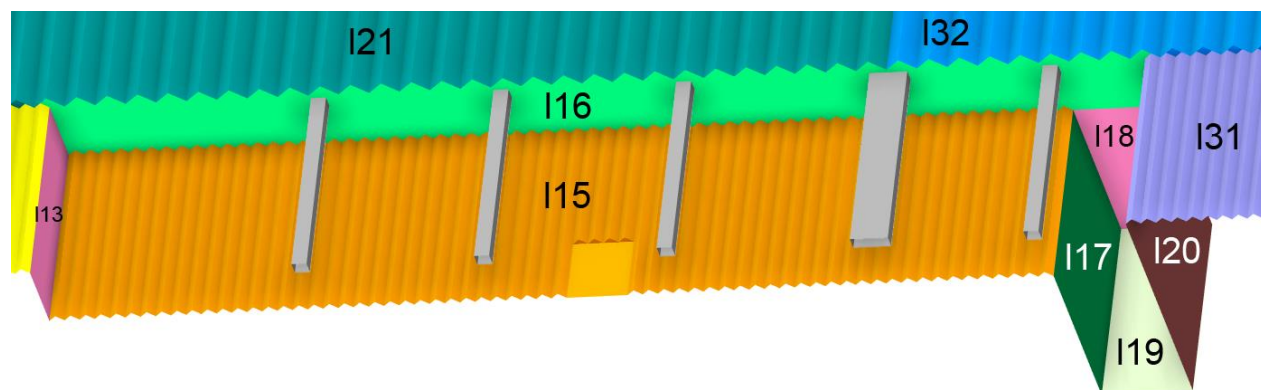


Рис. 0.6 Схема компонент южной стороны Театра для сбора аэродинамических нагрузок. Вид снизу

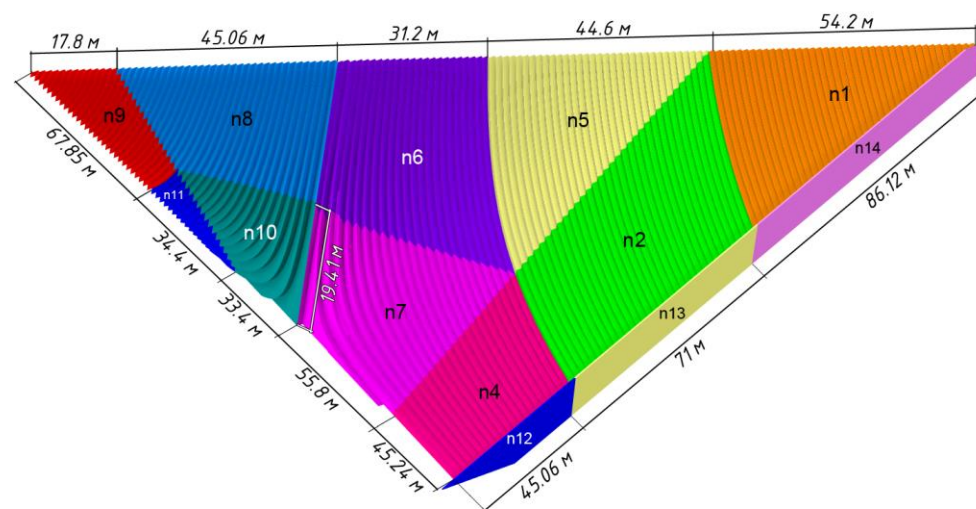


Рис. 0.7 Схема компонент западной стороны Театра для сбора аэродинамических нагрузок. Вид сверху

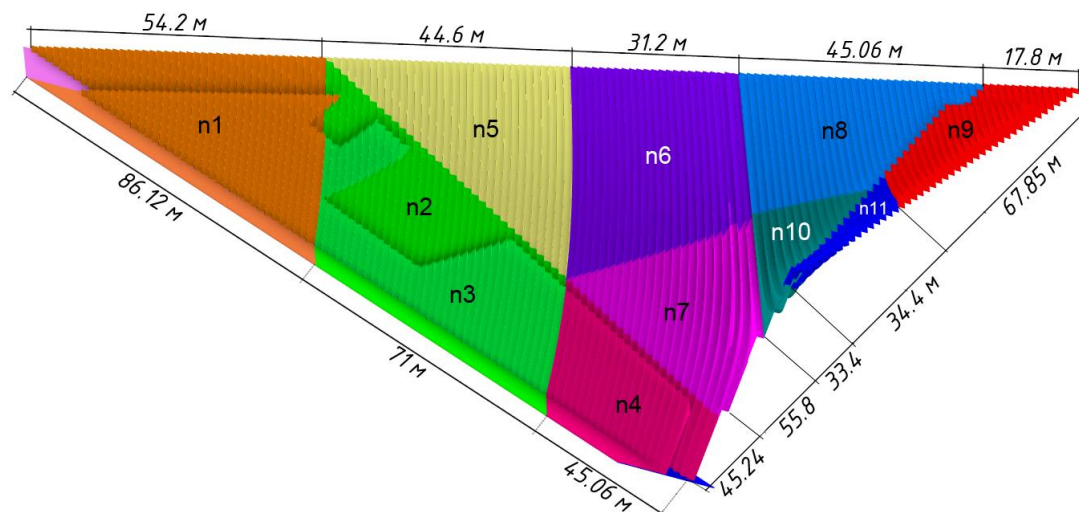


Рис. 0.8 Схема компонент западной стороны Театра для сбора аэродинамических нагрузок. Вид снизу

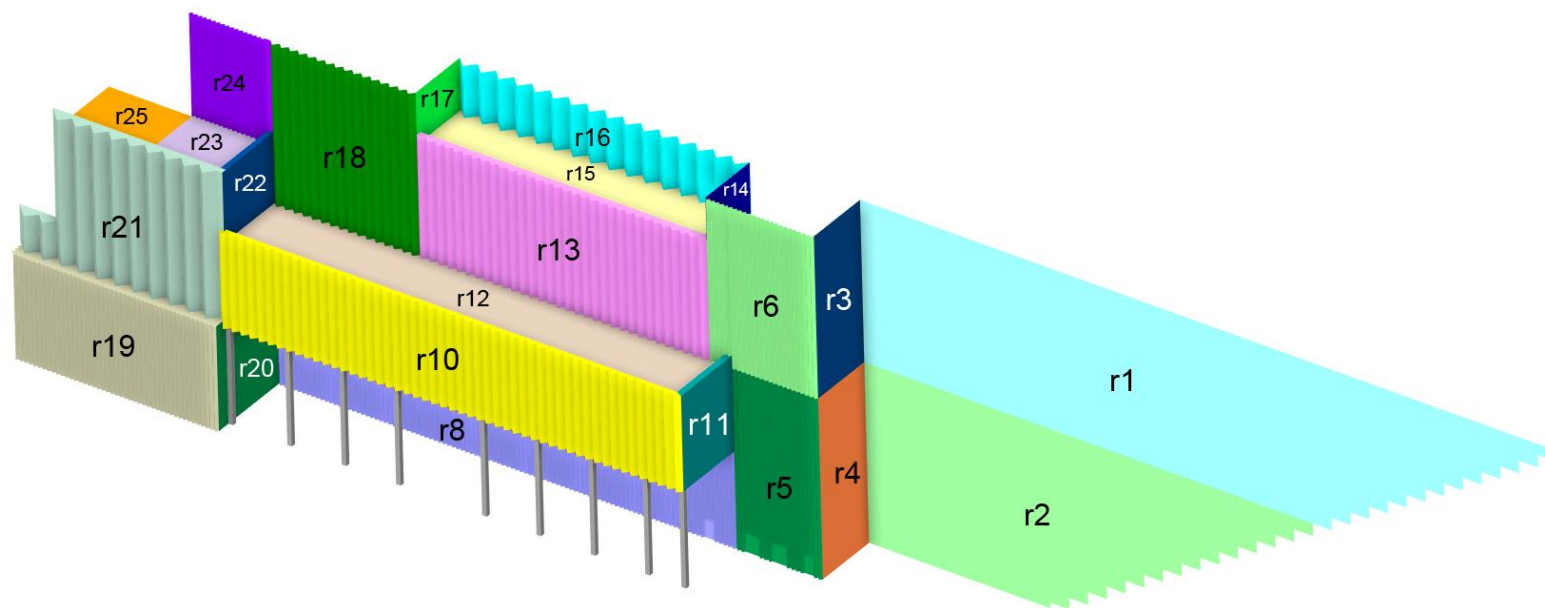


Рис. 0.9 Схема компонент *северной части Театра* для сбора аэродинамических нагрузок. Вид сверху

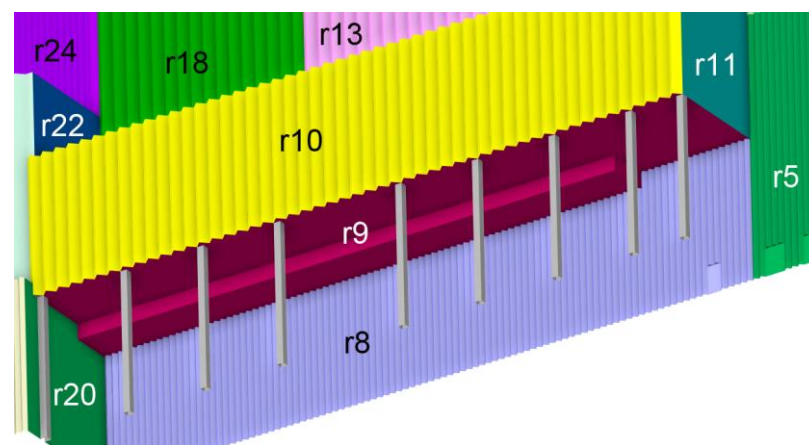


Рис. 0.10 Схема компонент *северной части Театра* для сбора аэродинамических нагрузок. Вид снизу

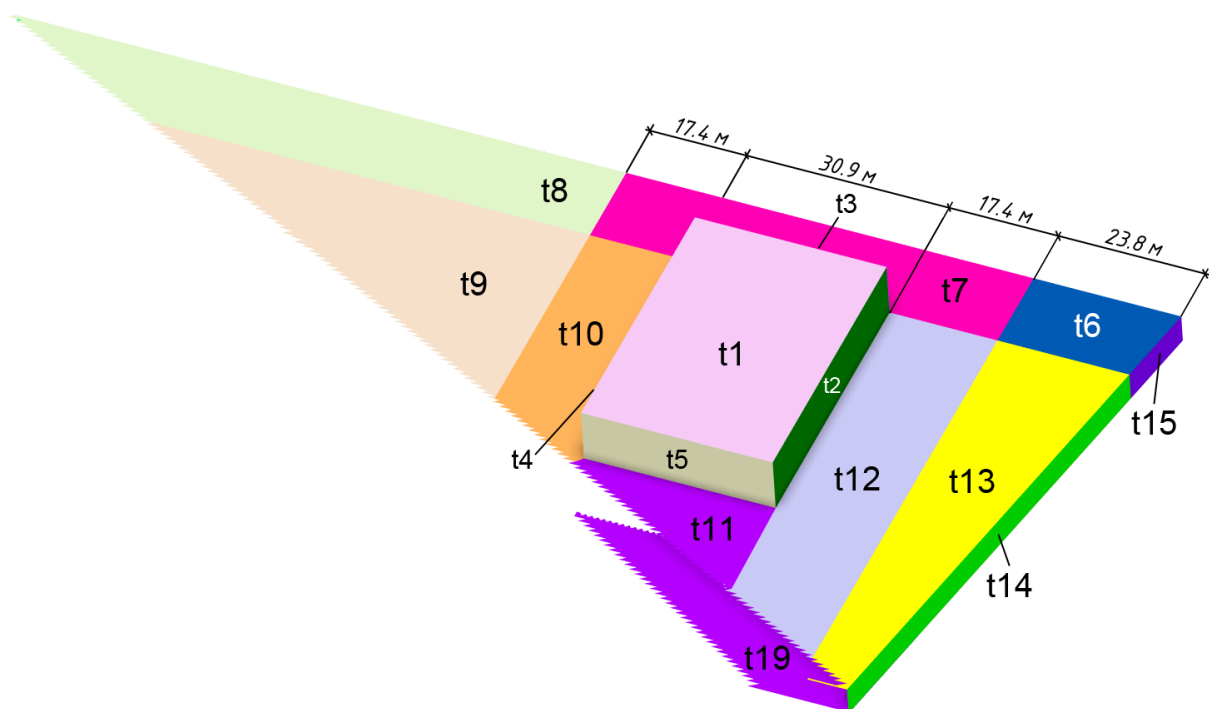


Рис. 0.11 Схема компонент верхних покрытий Театра для сбора аэродинамических нагрузок. Вид сверху

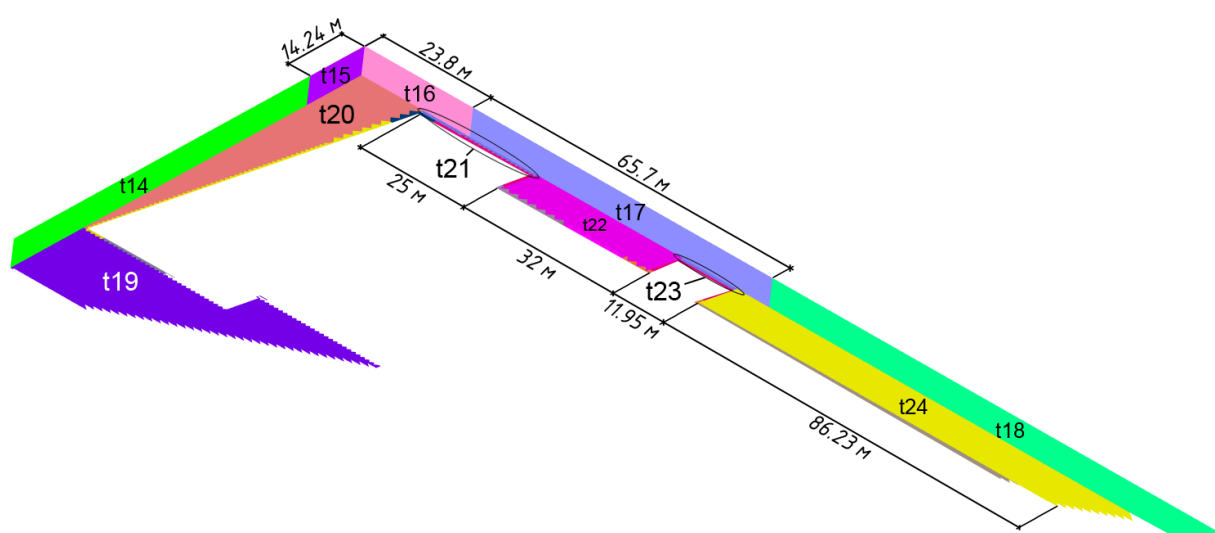


Рис. 0.12 Схема компонент верхних покрытий Театра для сбора аэродинамических нагрузок. Вид снизу

Выводы и рекомендации

По результатам выполненного комплексного аэродинамического исследования по проектируемому Объекту «Театр оперы и балета» (г. Калининград) на основе численного решения трехмерных задач аэродинамики, можно сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. На основе анализа и обобщения исходных данных разработаны и верифицированы расчетные трехмерные численные модели ветровой аэродинамики Объекта с учетом и без учета окружающей застройки.

2. С использованием современных численных методов гидрогазодинамики, реализованных в программном комплексе ANSYS CFD (CFX), и разработанной численной методики определения ветровых нагрузок и воздействий на несущие и фасадные конструкции проведены многовариантные расчетные исследования ветровой аэродинамики Объекта для 48 расчетных случаев (по 24 направления ветра с шагом 15° с учетом и без учета окружающей застройки) и моделирование снеговых нагрузок для 54 расчетных случаев (9 направлений ветра и 6 различных скоростей ветра).

3. Определены расчетные средние и пульсационные составляющие ветрового давления на несущие конструкции Объекта:

а) максимальное значение суммарной вертикальной силы (F_z) на несущие конструкции *верхнего покрытия без учёта окружающей застройки* реализуется при угле атаки ветра 15° и составляет *361.2 тс* (направление вверх), *с учётом окружающей застройки* – при угле атаки 0° и составляет *276.3 тс* (направление вверх);

б) максимальное значение суммарной вертикальной силы (F_z) на *все* несущие конструкции *без учёта окружающей застройки* реализуется при угле атаки ветра 195° и составляет *538.9 тс* (направление вверх), *с учётом окружающей застройки* – при угле атаки 0° и составляет *338.3 тс* (направление вверх);

в) максимальное значение векторной суммы нагрузки (F_R) на *все* несущие конструкции *без учёта окружающей застройки* реализуется при угле атаки ветра 210° и составляет *369.6 тс* (направление вверх), *с учётом окружающей застройки* – при угле атаки 30° и составляет *305.6 тс* (направление вверх).

В прочностных расчетах несущих конструкций рекомендуется рассмотреть наиболее опасные и характерные направления ветра 30° , 120° , 210° , 345° . Соответствующие значения ветровых давлений (средних, пульсационных и их суммы) представлены в разделе 5.2 настоящего отчета. В прочностных расчетах несущих конструкций верхних покрытий Объекта рекомендуется рассмотреть наиболее опасные и характерные направления ветра 15° , 60° и 330° . Соответствующие значения ветровых давлений (средних, пульсационных и их суммы) представлены в разделе 5.2 настоящего отчета.

4. Определены пиковые ветровые давления на ограждающие конструкции Объекта:

- *без учёта окружающей застройки*:
 - пиковое *минимальное (отсос)* ветровое давление на ограждающие (фасадные) конструкции реализуется при угле атаки ветра 225° и составляет **-5650 Па**. Для большей части остальных углов атаки минимальное ветровое давление не превышает **-4000 Па**;
 - пиковое *максимальное (напор)* ветровое давление на ограждающие (фасадные) конструкции *без учёта окружающей застройки* реализуется при угле атаки ветра 345° и

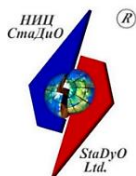
составляет **1333 Па**. Для большей части остальных углов атаки максимальное ветровое давление не превышает **1250 Па**.

- с учётом окружающей застройки:
 - пиковое *минимальное (отсос)* ветровое давление на ограждающие (фасадные) конструкции реализуется при угле атаки ветра 150° и составляет **-4467 Па**. Для большей части остальных углов атаки минимальное ветровое давление не превышает **-3500 Па**;
 - пиковое *максимальное (напор)* ветровое давление на ограждающие (фасадные) конструкции реализуется при угле атаки ветра 330° и составляет **1126 Па**. Для большей части остальных углов атаки максимальное ветровое давление не превышает **1000 Па**.

В прочностных расчетах ограждающих (фасадных) конструкций рекомендуется использовать значения пиковых ветровых давлений, представленные в разделе 5.3 настоящего отчета.

5. В силу сложной нестандартной формы покрытия Объекта при определении расчетных значений снеговых нагрузок применялся синтез нормативных рекомендаций и математического (численного) моделирования снеговых нагрузок. Полученные с помощью этого подхода значения коэффициента формы μ учитывают особенности сложной конструкции Объекта, отражают наиболее опасные для механической безопасности случаи распределения снегоотложений и, при этом, не противоречат положениям СП 20.13330.2016.

В прочностных расчетах Объекта рекомендуется использовать распределения коэффициента формы μ в соответствии с рис. 6.3-6.4 настоящего отчёта, полученные по схемам Б.1, Б.8 и Б.11 Приложения Б к СП [2] и по результатам моделирования, представленным в разделе 6.2 настоящего отчета.



Научно-исследовательский центр СтаДиО

Свидетельство СРО «АПОЭК» «Проектировщики оборонного и энергетического комплексов».

Номер решения о приеме в члены СРО № 06-ПСС-38/2018 от 20.06.2018 г.

125124, Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д.18, эт. 8, помещ. IX, ком. 13, т. (499)706-8810, e-mail:
stadyo@stadyo.ru

Инв. №11-МИ-07/21-4

“Утверждаю”

Генеральный директор ЗАО НИЦ СтаДиО

_____ А.М. Белостоцкий

“ ” _____ 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по научно-техническому сопровождению проектирования

Объекта: «Театр оперы и балета (950 мест)» по адресу: Российская
Федерация, Калининградская область, г. Калининград, о. Октябрьский»

Ответственный исполнитель
канд. техн. наук **Д.С. Дмитриев**

Исполнители
канд. техн. наук **А.С. Павлов**
канд. техн. наук **А.И. Нагибович**
С.О. Петряшев
С.В. Щербина
О.С. Горячевский
Н.А. Бритиков

Краткая характеристика проектируемого Театра оперы и балета

Театр оперы и балета в городе Калининград представляет собой сооружение сложной геометрической формы.

Конструктивная схема – каркасно-стенная с ядрами жесткости. Каркас образуется системой вертикальных элементов – стен, колонн и ядер жесткости, в роли которых выступают лестничные клетки и лифтовые шахты, и горизонтальных дисков – перекрытий.

Все узлы соединения элементов каркаса (стен, диафрагм, колонн, балок, плит перекрытий) имеют жесткое сопряжение. Таким образом, обеспечивается неразрезность систем элементов каркаса.

Пространственная жесткость обеспечивается совместной работой несущих конструкций перекрытий, железобетонных колонн, стен и вертикальных ядер жесткости (несущие железобетонные стены лестничных клеток и лифтовых шахт), имеющих жесткую заделку в свайный плитный ростверк.

Предусмотрена разрезка надземных конструкций деформационными швами вдоль осей «19»/«20» и «22»/«23» и «32»/«33» на отдельные блоки.

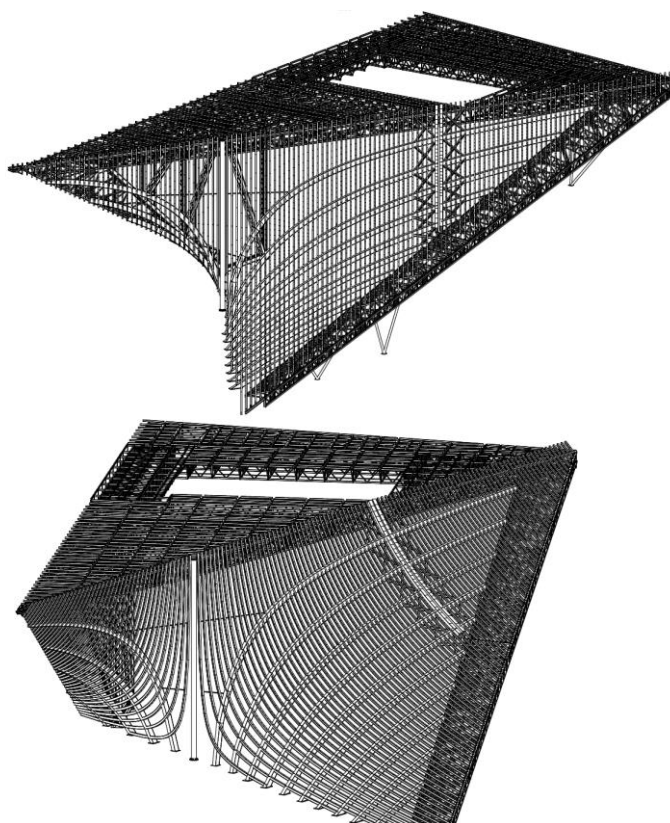


Рис. 0.1 Общий вид стальных конструкций Театра оперы и балета

Фундамент здания предусмотрен свайный с плитным ростверком толщиной 600мм и 1200 мм. В фундаменте используются сваи БНС диаметром 1000 мм. Предусмотрена жесткая заделка свай в ростверк. Подошва ростверка расположена на отм. -1.100 (абс. отм. +2,450), отм. -1,700 (абс. отм. +1,850). Ростверк предусмотрен из бетона В30 W8 F150, армирование из арматуры А500с. Под ростверком предусмотрено устройство песчаной подготовки из песка ср. крупности толщиной 100 мм и бетонной подготовки толщ. 100мм из бетона В7.5.

Несущие конструкции каркаса здания запроектированы монолитными железобетонными.

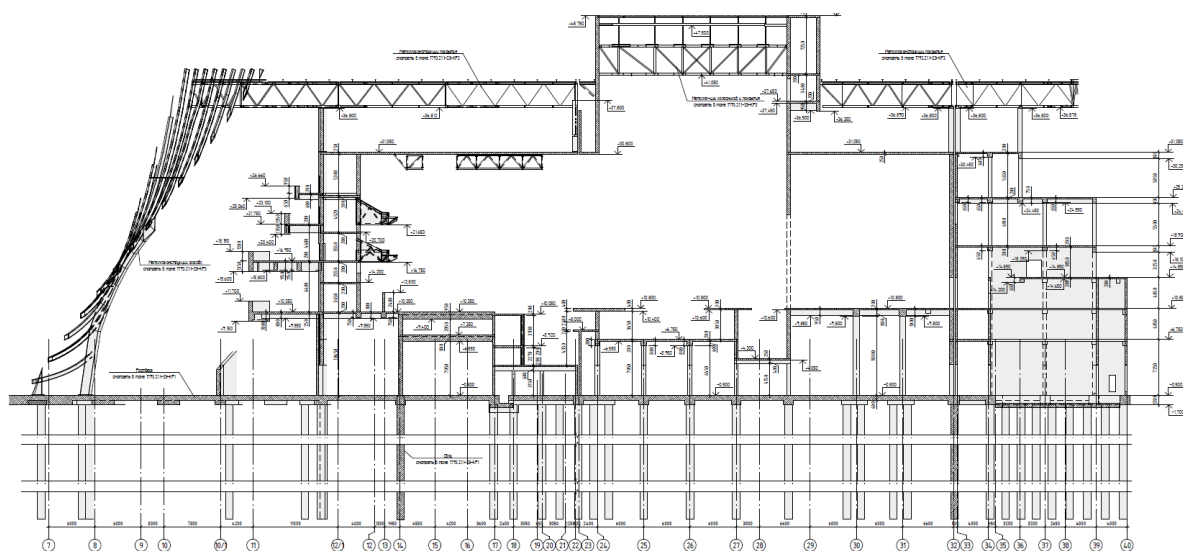


Рис. 0.2 Продольный разрез по зданию Театра оперы и балета

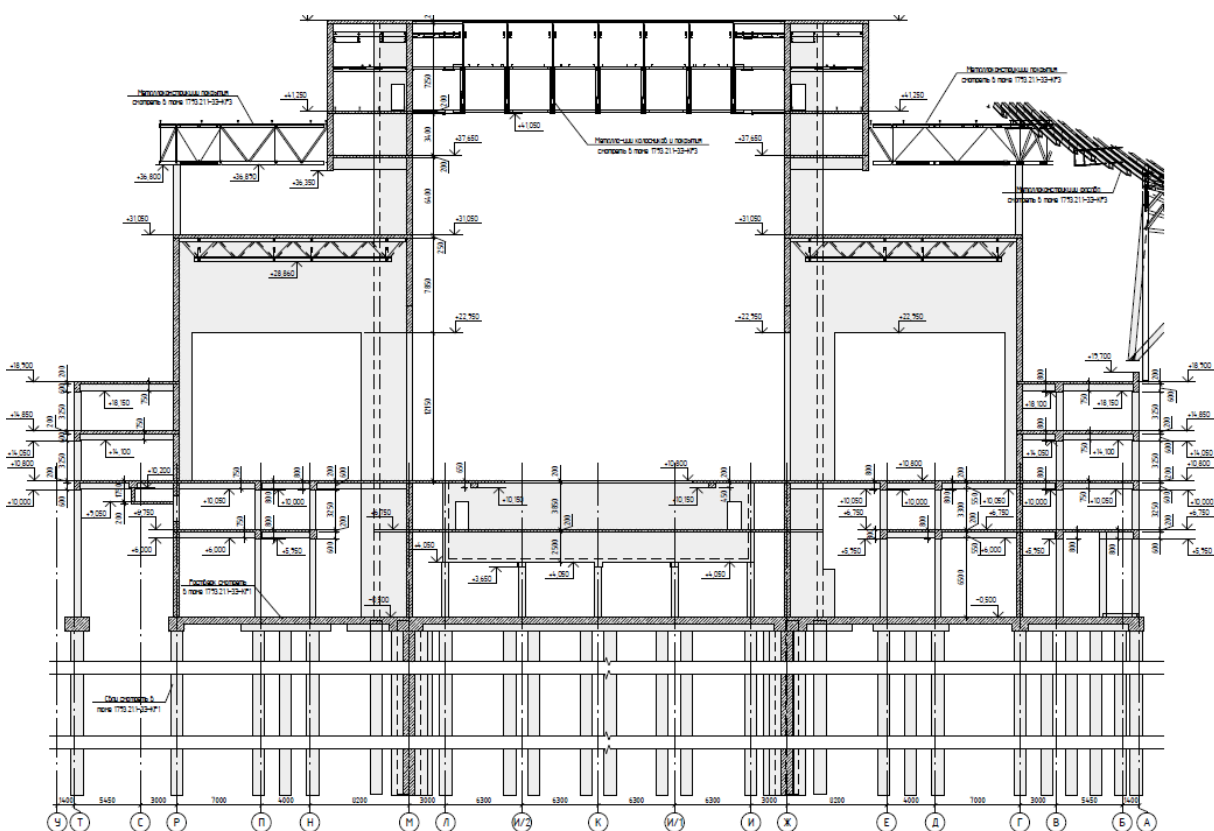


Рис. 0.3 Поперечный разрез по зданию Театра оперы и балета

Нагрузки и воздействия, принятые при расчетном обосновании

При проектировании несущих конструкций Театра оперы и балета в г. Калининград, значения нагрузок и воздействий и их сочетаний принимались в соответствии с нормативными документами [Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.], с заданием на проектирование, специальными техническими условиями [Error! Reference source not found.] и рекомендациями по назначению ветровых и снеговых нагрузок [Error! Reference source not found.].

В рамках научно-технического сопровождения проектирования были проведены комплексные аэродинамические исследования на основе численного решения задач строительной аэродинамики [Error! Reference source not found.] согласно положениям СТУ [Error! Reference source not found.], по результатам которых были представлены:

- расчетные средние и пульсационные составляющие ветрового давления на несущие конструкции;
- пиковые ветровые давления на ограждающие конструкции (фасады);
- расчетные значения снеговых нагрузок.

Полученные в результате комплексных аэродинамических исследований нагрузки использовались при расчетном обосновании конструкций Театра оперы и балета в г. Калининград [Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.].

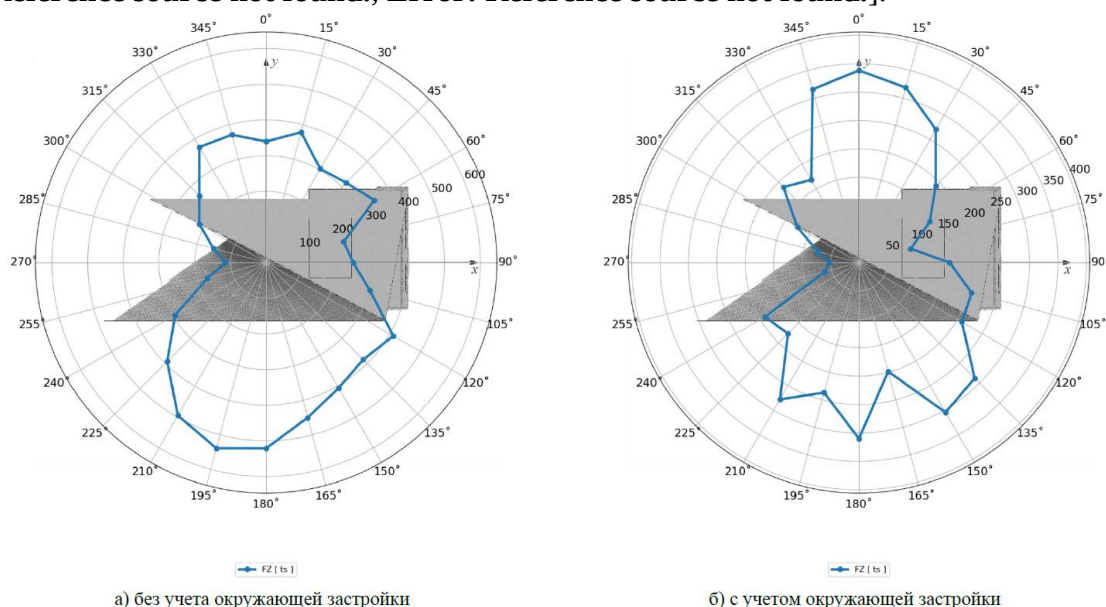


Рис. 0.1 Суммарные расчетные ветровые нагрузки (FZ) в зависимости от направления ветра на несущие конструкции Объекта, тс (значения приведены от модулю)

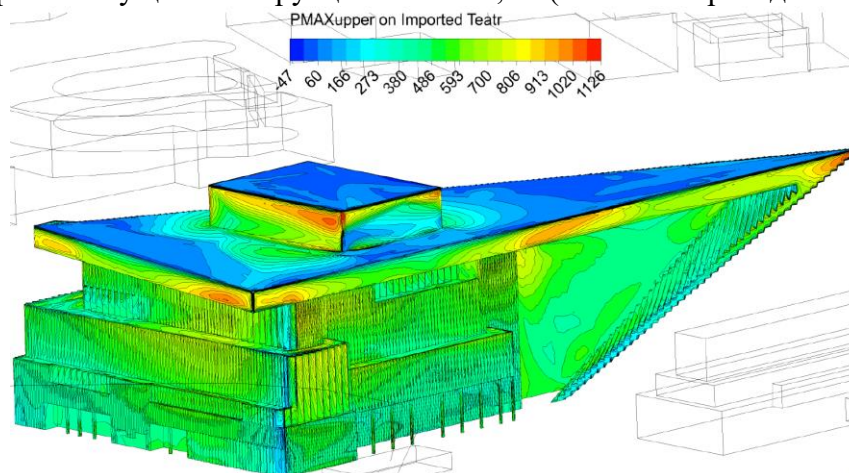


Рис. 0.2 Верхняя огибающая максимальных значений ветрового давления (Па) на ограждающие (фасадные) конструкции

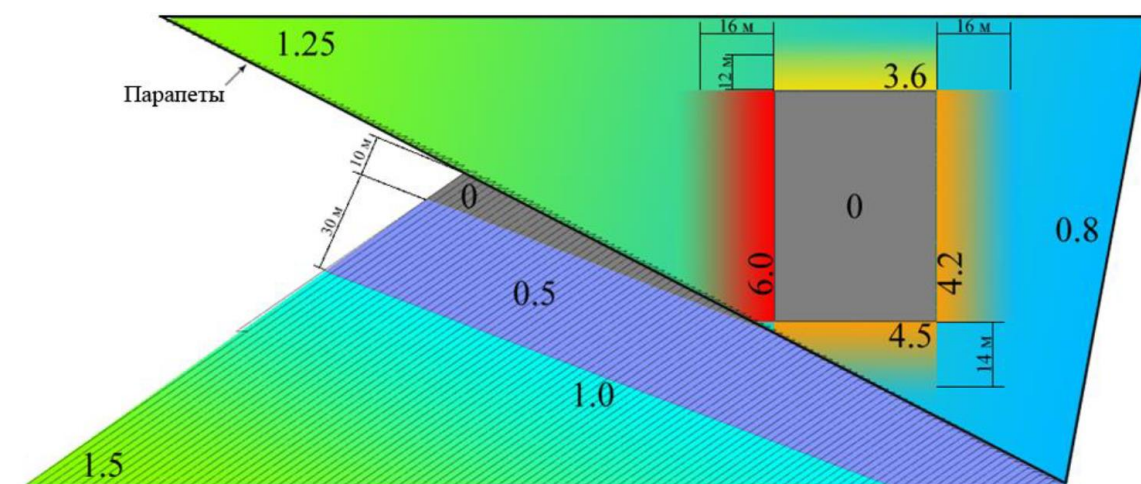


Рис. 0.3 Схемы расчётного коэффициента формы μ для верхних покрытий Объекта (один из 4х вариантов, подробный графический материал представлен в [Error! Reference source not found.])

Для назначения сейсмического воздействия, был проведен анализ геофизических исследований [Error! Reference source not found.] и обоснованно выбран набор спектров реакции (ответа) для расчета конструкции по линейно-спектральной теории (сейсмическое воздействие уровня РЗ) и набор акселерограмм для расчета конструкции прямым динамическим методом (сейсмическое воздействие уровня КЗ). Выбранный набор акселерограмм отвечает необходимым требованиям к данным геофизических изысканий, а полученные спектры ответа сопоставлены с нормативным спектром, заданным по СП 14.13330.2018 [Error! Reference source not found.]. Для расчетного обоснования фасадных конструкций были подготовлены спектры ответа, построенные по расчетным акселерограммам, полученным в результате динамического анализа модели сооружения с интегрированием по времени.

Подробная информация по выбору спектров, набора акселерограмм и сейсмических коэффициентов представлена в локальном заключении, выполненном в рамках научно-технического сопровождения проектирования [Error! Reference source not found.].

Анализ конструкций сцен театра

В здании театра предусмотрено две сцены: основная сцена в Большом зале и малая сцена (камерная) в Малом зале. Входные вестибюли для Большой и Малой сцены разнесены в плане, каждый зал имеет обособленный вход и необходимый набор обслуживающих зрителей помещений. В Большом зале проектом предусмотрена глубинная колосниковая сцена в составе: аванс сцена, сцена, карманы сцены, карман сцены с участком сборки / репетиционный зал, карман сцены с участком сборки, арьер сцена.

Проведены оценки прочности конструкций Малой и Большой сцен в рамках общей модели системы «основание – несущие конструкции театра» на основное и особое сочетание нагрузок и воздействий.

При проектировании конструкций трибун необходимо исключить возможность их резонансного возбуждения, от синхронного движения людей. Так как в Малом зрительском зале зрительские места и сцена располагаются на отметке фундамента, оценку возможности возникновения резонанса для сцены Малого зала проводить не нужно.

Сцена в Большом зрительном зале представляет собой двух ярусную этажерку и оценку возможности возникновения резонансных явлений для конструкций сцены Большого зрительного зала необходимо проводить, как для трибун спортивных

сооружений. Такая проверка проводится путем анализа собственных частот и форма колебания конструкций сцены и сопоставления их с критериальными параметрами. В качестве критериев принимаются ограничения по низшим собственным частотам, первая собственная частота горизонтальных колебаний трибун должна быть более 3 Гц, а низшая частота вертикальной формы колебаний должна быть больше 5 Гц (согласно подходам, применяемым в европейских нормах [Error! Reference source not found.], а также принятой в России инженерной практике [Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.]).

Модальный анализ (определение собственных форм и частот колебаний) конструктивных элементов сцены Большого зрительного зала проводился с учетом масс от собственного веса конструкций, постоянной нагрузки, но без учета полезной нагрузки (ввиду неопределенности этого параметра). В рамках расчетного обоснования элементов сцены проведено определение динамических характеристик и низшая частота горизонтальных колебаний конструкций сцены равна 3.862 Гц (рис. 6.1, таблица 1), что выше критериального значения - 3 Гц, а частота первой вертикальной формы колебаний (рис. 6.2, таблица 1) равна 6.199, что выше критериального значения - 5 Гц.

Согласно примечанию к табл.8.3 СП 20.13330.2016 [Error! Reference source not found.] при проектировании сцен театрально-зрелищных предприятий необходимо учитывать динамическое воздействие с частотой 2 Гц. Исходя из того, что низшие собственные частоты колебаний конструкций сцены выше 3 Гц (см. рис.6.1) резонансные явления от такого воздействия возникнуть не могут.

При расчете конструкций сцены на динамическое воздействие (раздел №9 [Error! Reference source not found.]) с частотой 2 Гц и интенсивностью (амплитудой) равной 1.7 кПа, заданное по синусоидальному закону во временной области (гармоническое воздействие), назначать дополнительный коэффициент динамичности не нужно, так как такой тип анализа (гармонический) позволяет учесть динамические эффекты.

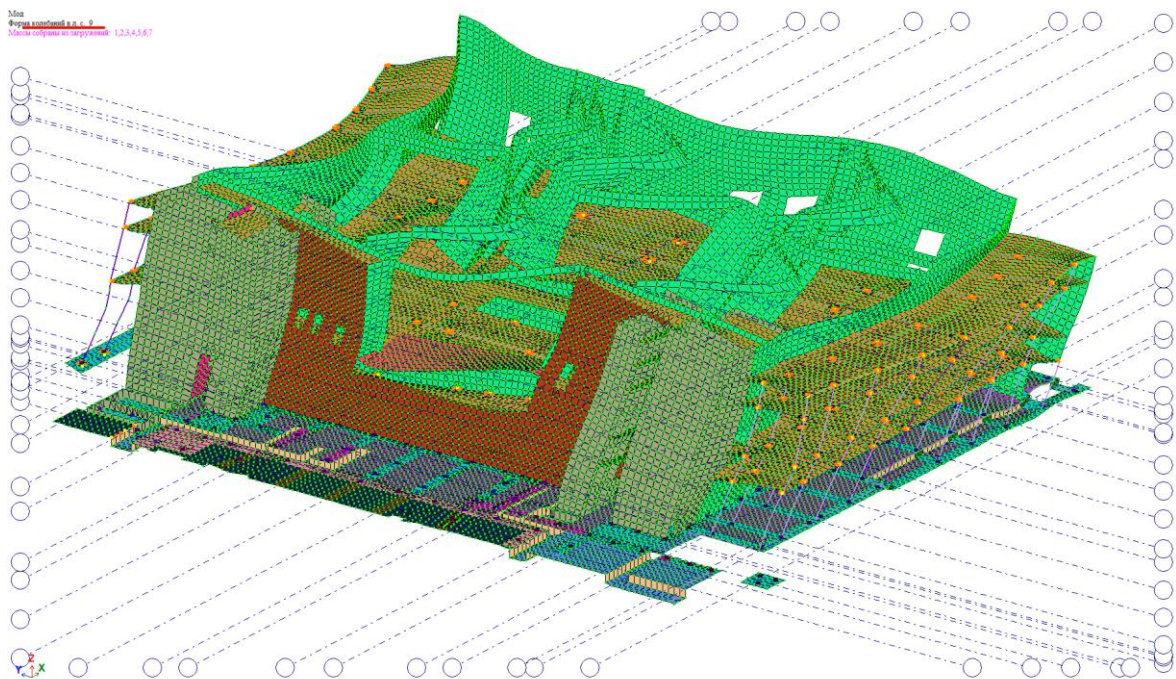


Рис. 0.1 Низшая горизонтальная форма колебаний конструкций сцены Большого зрительного зала. $f_9 = 3.862$ Гц

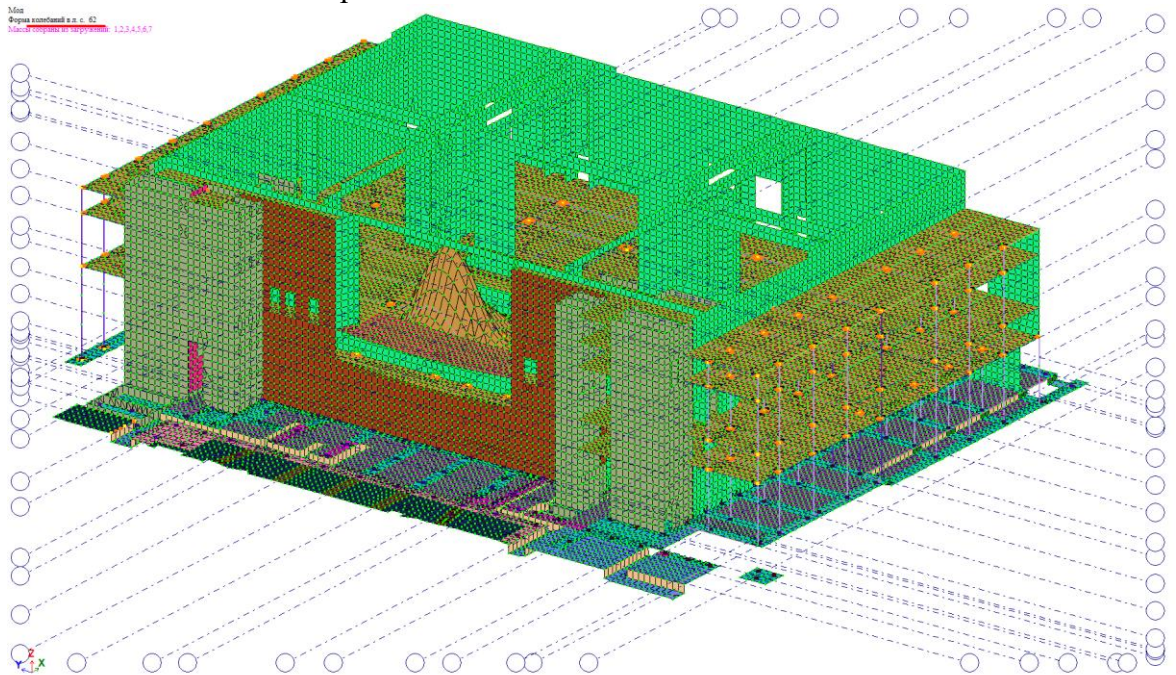


Рис. 0.2 Низшая вертикальная форма колебаний конструкций сцены Большого зрительного зала. $f_{62} = 6.199$ Гц

Таблица 1. Частоты собственных колебаний конструкций сцены Большого зрительного зала							
№ загрузки	№ формы	Собст. значения	Круг. частота (рад/с)	Частота (Гц)	Период (с)	Коеф.распред.	
8	9	0,041	24,268	3,862	0,259	- 14,298	
8	62	0,026	38,951	6,199	0,161	1,960	

Анализ фасадных систем

В театре оперы и балета в г. Калининград применяются несколько типов фасадных систем:

- фасадные конструкции в зоне гипара;
- навесные вентилируемые фасады;
- светопрозрачные фасадные системы.

Расчетное обоснование фасадных систем выполнено в рамках локальных расчетных моделей в ПК ЛИРА-САПР [Error! Reference source not found.]. Расчет выполнен на основное и особое (сейсмическое) сочетание нагрузок и воздействий. В качестве исходного сейсмического воздействия использовались спектры реакции, полученные из ответных акселерограмм, снятых с общей модели после расчета системы «основание – конструкции театра» прямым динамическим методом с интегрированием по времени. Было выбрано несколько точек вывода ответных акселерограмм для каждого типа фасада и построены огибающие спектры, учитывающие коэффициенты K_0 , K_1 , K_ψ , K_2 в соответствии с СТУ [Error! Reference source not found.].

На рисунках

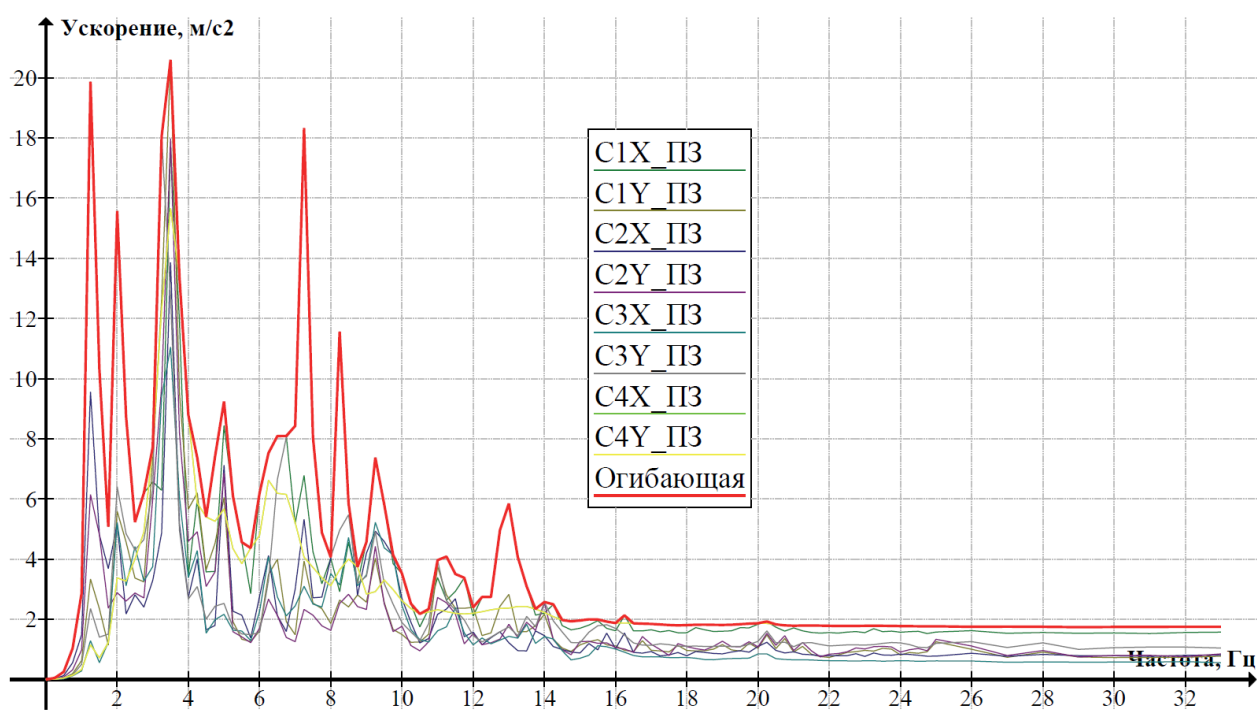


Рис. 0.1 Огибающий горизонтальный спектр реакции для расчета навесного вентилируемого фасада

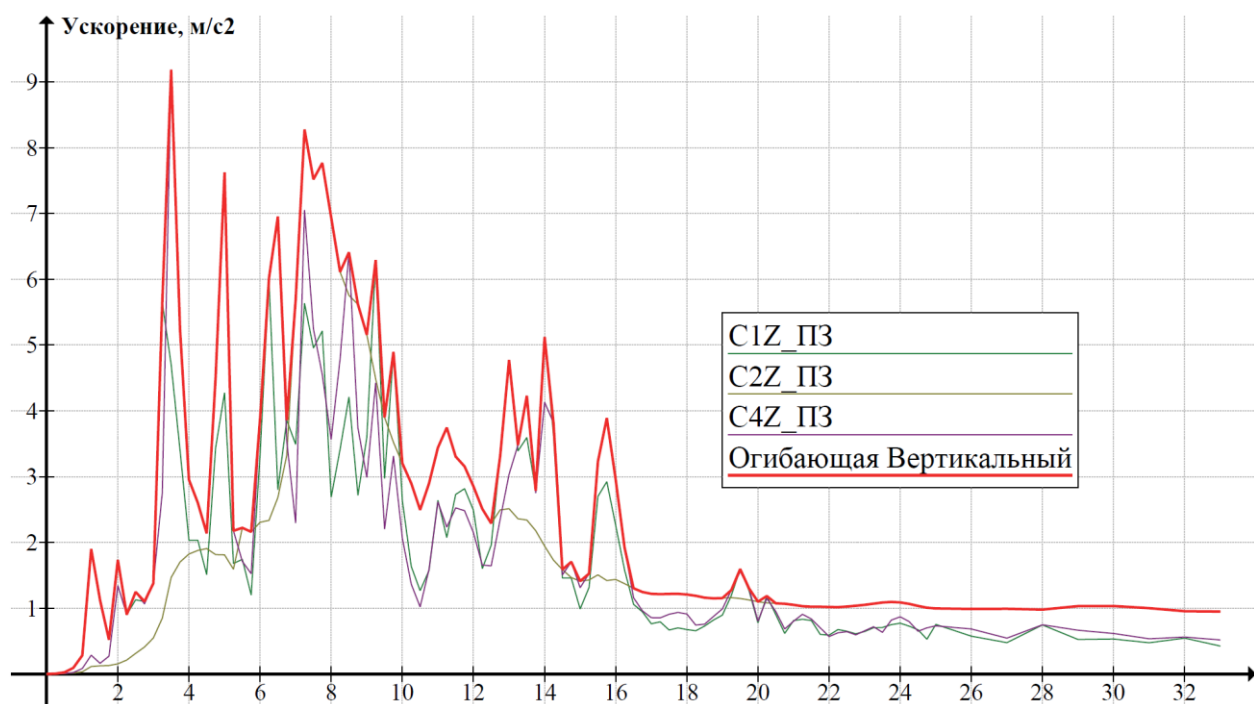


Рис. 0.2 Огибающий вертикальный спектр реакции для расчета навесного вентилируемого фасада

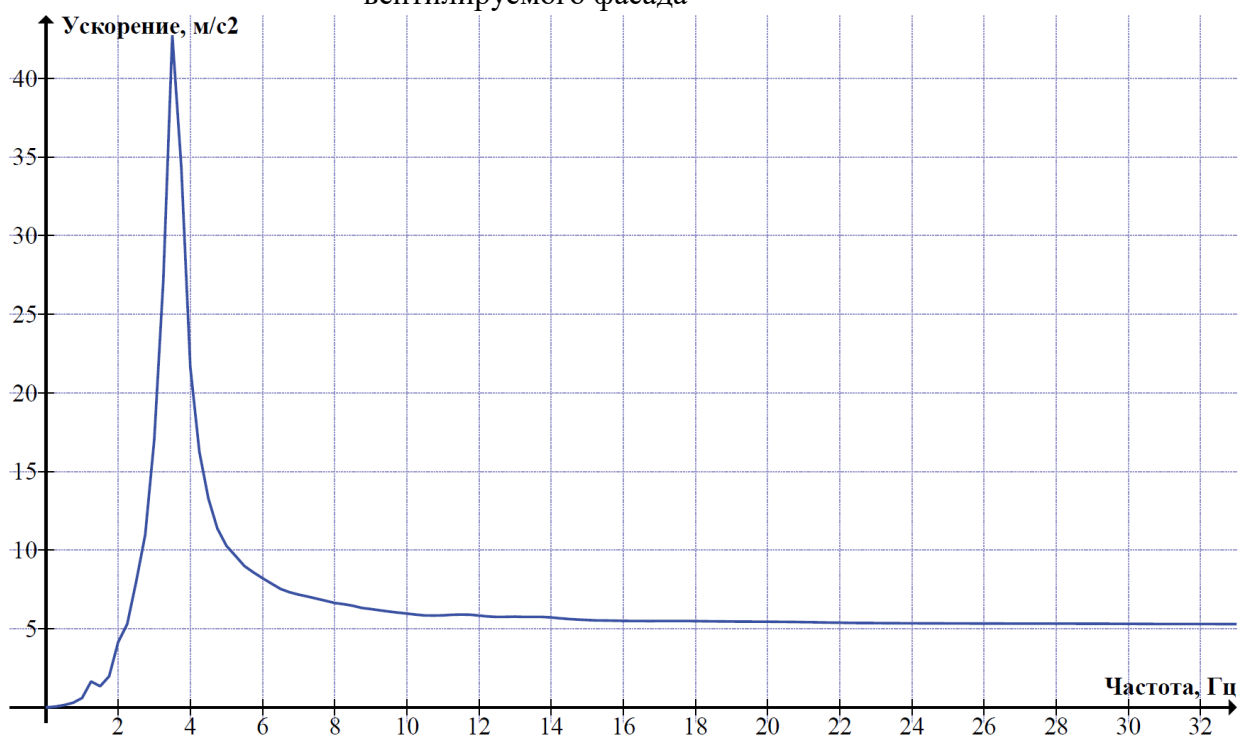


Рис. 0.3 Огибающий горизонтальный спектр реакции для расчета светопрозрачной фасадной системы (для витража по оси «П» м/о «2»/«14»)

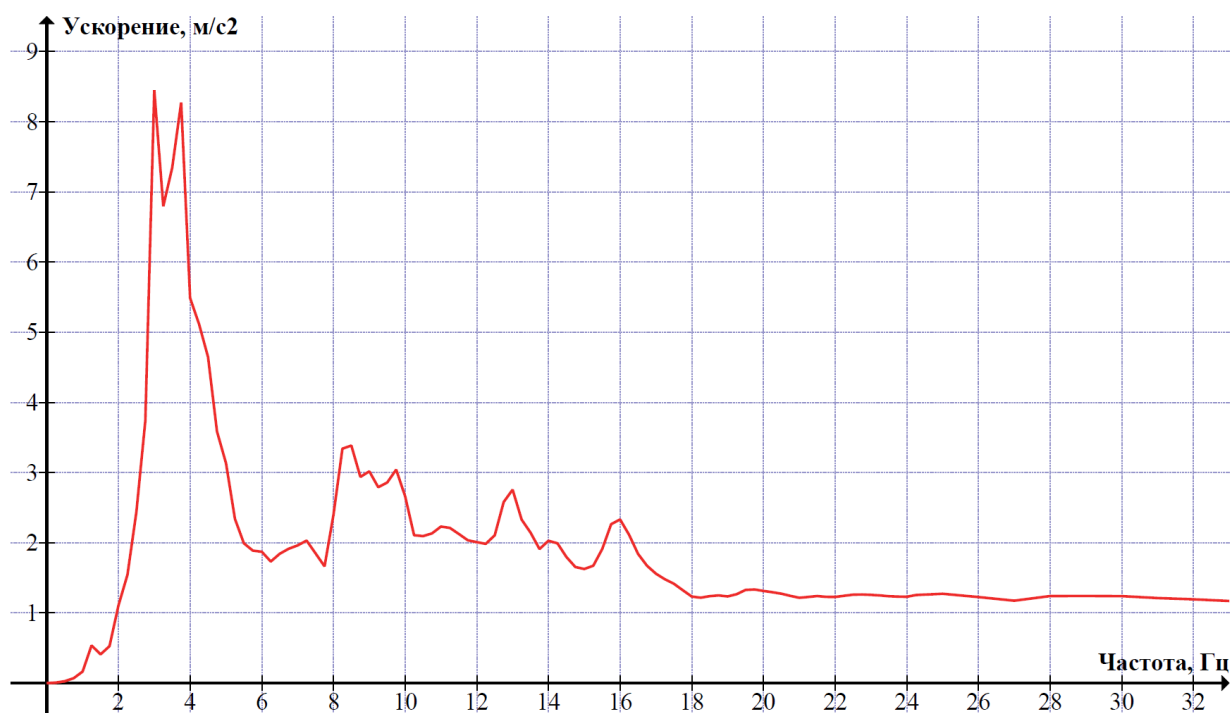


Рис. 0.4 Огибающий вертикальный спектр реакции для расчета светопрозрачной фасадной системы (для витража по оси «П» м/о «2»/«14»)

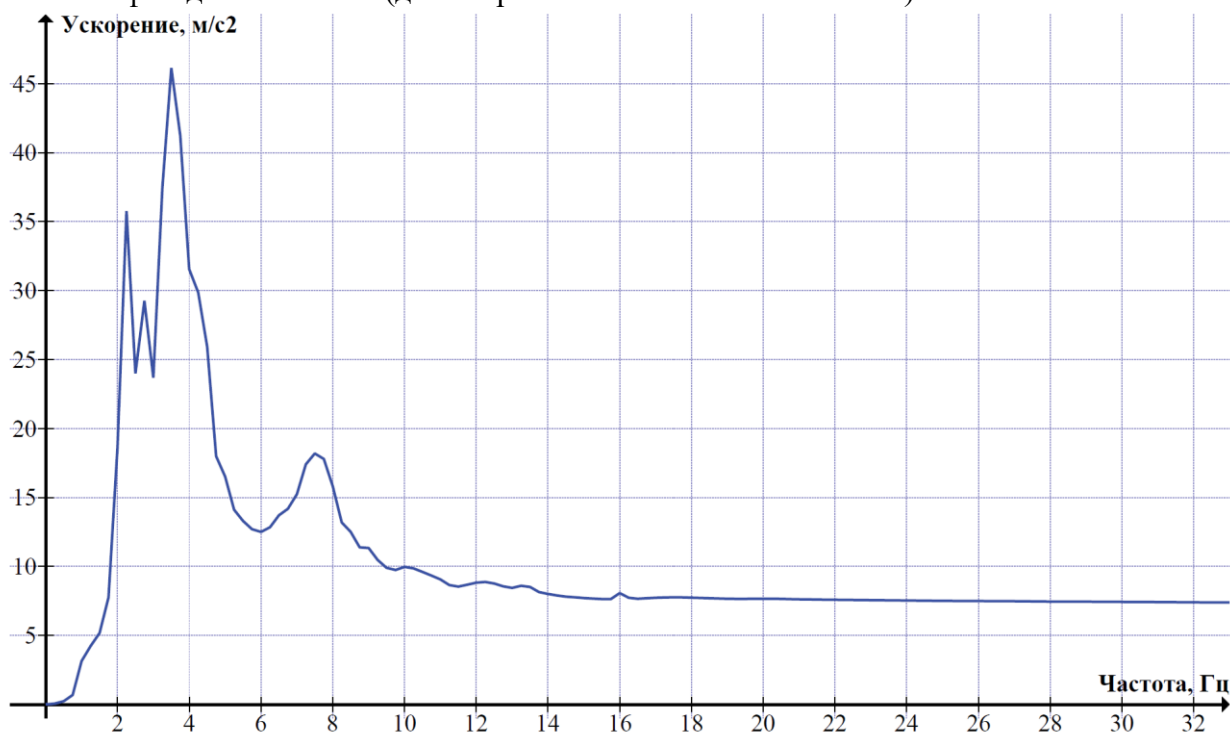


Рис. 0.5 Огибающий горизонтальный спектр реакции для расчета светопрозрачной фасадной системы (для витража по оси «Д» м/о «2»/«10/1»)



Рис. 0.6 Огибающий вертикальный спектр реакции для расчета светопрозрачной фасадной системы (для витража по оси «Д» м/о «2»/«10/1»)

Фасадные конструкции в зоне гипара

Основными элементами крепления фасадных конструкций в зоне гипара являются стальные стойки (Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-93 L100x8). В рамках расчетного обоснования проведен расчет на основное и особое сочетание нагрузок и воздействий [Error! Reference source not found.]. Прочность элементов крепления фасадных элементов в зоне гипара подтверждена, максимальный коэффициент использования 0.893 (предельная гибкость свеса полки (поясного листа) из условия местной устойчивости)

Навесные вентилируемые фасады

В проекте применен вентилируемый фасад по сертифицированной подсистеме U-kon (либо аналогичной). Крепление осуществляется к монолитным несущим конструкциям с помощью анкеров, либо к металлическому фахверку наружных кладочных стен с помощью металлических шпилек. Крепление к монолитным железобетонным конструкциям осуществляется с помощью анкеров. Проведены расчеты фасадных систем, подтверждена их механическая безопасность.

Светопрозрачный фасад

В проекте применена стоечно-ригельная система витражных светопрозрачных конструкций. Крепление осуществляется к монолитным несущим конструкциям с помощью анкеров, либо к металлическому фахверку стальных конструкций. Крепление к монолитным железобетонным конструкциям осуществляется с помощью анкеров. Проведены расчеты светопрозрачных фасадных конструкций, подтверждена их механическая безопасность.

На этапе подготовки рабочей документации по фасадным системам должна быть получена установленная законодательством Российской Федерации техническая документация, подтверждающая возможность их использования, в том числе на основании результатов соответствующих испытаний. А также необходимо проводить детально научно-техническое сопровождение фасадных систем и их отдельных элементов, включающее расчетное обоснование, в том числе на сейсмические воздействия.

Выводы

По результатам комплекса научно-исследовательских работ, выполненных в рамках научно-технического сопровождения проектной документации Объекта «Театр оперы и балета в г. Калининград», можно сделать следующие выводы.

1. Проведен всесторонний анализ проектной документации [Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.], включая изыскания [Error! Reference source not found.] и материалы расчетного обоснования механической безопасности [Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.], а также контроль проектирования согласно [Error! Reference source not found.]. Принятые конструктивные решения для рассматриваемого Объекта соответствуют требованиям действующих общестроительных нормативных документов и результатам выполненных альтернативных расчетных исследований (см. ниже) [Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.].

2. Принятые конструктивные решения для рассматриваемого Объекта соответствуют требованиям действующих общестроительных нормативных документов и специальных технических условий, результатам выполненных альтернативных расчетных исследований (см. ниже) [Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.]. Требования и условия, принятые при проектировании, соответствуют действующим нормам, а технические решения по требованиям, не регламентированным нормативными документами [Error! Reference source not found.], приняты с надлежащим обоснованием.

3. В рамках научно-технического сопровождения проектной документации и в соответствии с положениями СТУ [Error! Reference source not found.] проведены комплексные аэродинамические исследования Объекта (с учетом окружающей застройки) на основании численного решения трехмерных задач аэродинамики [Error! Reference source not found.].

3.1. В результате численного решения задач аэродинамики определены расчетные средние и пульсационные составляющие ветровых нагрузок на несущие конструкции, которые использованы в расчетных обоснованиях строительных конструкций Объекта [Error! Reference source not found.-Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.].

3.2. Определены пиковые ветровые давления на фасадные конструкции Объекта, которые использованы при их расчетном обосновании.

3.3. На основе синтеза численных и нормативных методик определены распределения расчетных значений снеговых нагрузок (4 карты неравномерной снеговой нагрузки [Error! Reference source not found.]).

4. В рамках НТС подтверждено соответствие расчетных моделей ООО «МАРКС ИНЖИНИРИНГ», разработанных в ПК ЛИРА-САПР, принятым конструктивным решениям, жесткостным и прочностным характеристикам материалов (в том числе по данным НТС проектирования фундамента [Error! Reference source not found.]) и отсутствие необоснованных упрощений расчетных моделей, способных значительно повлиять на результаты расчетного обоснования (раздел 5 настоящего Заключение).

5. В соответствии с «Рекомендациями...» ФАУ «Главгосэкспертиза России» [Error! Reference source not found.] и ГОСТ 27751-2014. «Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования» [Error! Reference source not found.] в настоящем Заключении выполнена проверка разработанных альтернативных расчетных моделей (в верифицированных в системе РААСН программных средствах), проведено сопоставление результатов альтернативных («параллельных») расчетов. 6. На основании сравнительного анализа альтернативных результатов расчетов пространственной системы «основание — сооружение» (ЗАО НИЦ СтаДиО – ПК ANSYS Mechanical и ПК SCAD OFFICE [15]; ООО «МАРКС ИНЖИНИРИНГ» – ЛИРА-САПР [7, 10]) следует сделать вывод о приемлемом соответствии значимых параметров напряженно-деформированного состояния (перемещений, усилий) и динамических характеристик (значимых собственных частот и форм колебаний) несущих конструкций Театра оперы и балета при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий.

6. Железобетонные конструкции

6.1. В ходе НТС проведен анализ проектной документации по железобетонным конструкциям Театра оперы и балета [Error! Reference source not found.]. В результате анализа подтверждается соответствие принятых конструктивных решений (по железобетонным конструкция Объекта) действующим нормативным документам и требованиям СТУ [Error! Reference source not found.], а также обоснованность принятых конструктивных решений.

6.2. Разработана и верифицирована в ПК SCAD OFFICE пространственная конечноэлементная модель железобетонных и стальных конструкций Театра оперы и балета, адекватно отражающие их геометрико-жесткостные, инерционные и нагрузочные характеристики и результирующее напряженно-деформированное состояние, параметры прочности, устойчивости и динамики железобетонных конструкций.

6.3. Выполненными расчетными исследованиями на основное и особое (сейсмическое воздействие и локальное разрушение) сочетание нагрузок и воздействий установлено, что при соблюдении принятых параметров проекта (геометрия, сечения конструктивных элементов, свойства материалов и соединений, величины и сочетания нагрузок и воздействий) состояние несущих железобетонных конструкций Объекта удовлетворяет нормативным критериям механической безопасности (деформативности, прочности и устойчивости). Критериальные значения кинематических параметров несущих конструкций (осадки, прогибы плит перекрытий, горизонтальные перемещения) находятся в диапазоне нормативно-регламентированных величин [Error! Reference source not found.]. Максимальные расчетные усилия в сваях не превышают предельно допустимых значений (раздел 5.3 настоящего Заключения и [Error! Reference source not found.]).

6.4. В рамках НТС подтверждено, что расчетное армирование (в основном [Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.] и альтернативном [Error! Reference source not found.] обосновании) соответствует армированию, принятому в проектной документации [Error! Reference source not found.].

6.5. В рамках НТС проведены альтернативные расчеты на устойчивость к прогрессирующему обрушению железобетонных конструкций Театра оперы и балета по 10ти наиболее представительным сценариям инициирующих локальных разрушений [Error! Reference source not found.], проанализированы результаты основного расчетного обоснования [Error! Reference source not found.], где рассмотрено 30 сценариев локального разрушения. Устойчивость железобетонных конструкций Театра оперы и балета к прогрессирующему обрушению обеспечивается, что подтверждается выполненными расчетами.

6.6. Проведена оценка возникновения резонансного возбуждения в железобетонных конструкциях сцены. Критерии по низшим собственным частотам колебаний (< 3 и 5 Гц для горизонтальных и вертикальных форм) удовлетворяются. Резонансные явления в конструкциях сцены не возникают. Проведен расчет сцены на динамическое воздействие (согласно таб. 8.3 СП20 [Error! Reference source not found.]) и на основное сочетание статических нагрузок, проведены проверки прочности (подобрано армирование) [Error! Reference source not found.]. Механическая безопасность и комфортность (отсутствие резонансных явлений) железобетонных конструкции сцены подтверждена.

6.7. Принятые принципиальные конструктивные решения основных железобетонных конструкций Театра оперы и балета в г. Калининград, в части обеспечения несущей способности и механической безопасности, соответствуют требованиям действующих норм и подтверждаются проведенными расчетами.

7. Стальные конструкции

7.1. В ходе НТС проведен анализ проектной документации по несущим стальным конструкциям Театра оперы и балета [Error! Reference source not found.]. В результате анализа подтверждается соответствие принятых конструктивных решений (по стальным конструкция Объекта) действующим нормативным документам и требованиям СТУ [Error! Reference source not found.], а также обоснованность принятых конструктивных решений.

7.2. Разработана и верифицирована в ПК ANSYS Mechanical пространственная конечноэлементная модель железобетонных и стальных конструкций Театра оперы и балета, адекватно отражающие их геометрико-жесткостные, инерционные и нагрузочные характеристики и результирующее напряженно-деформированное состояние, параметры прочности, устойчивости и динамики стальных конструкций.

7.3. Проведен сопоставительный анализ альтернативных расчетов стальных конструкций Театра оперы и балета [Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.], достигнуто соответствие по основным критериальным параметрам (раздел 5.3 настоящего Заключение).

7.4. Выполненными расчетными исследованиями на основное и особое сочетание нагрузок и воздействий установлено, что при соблюдении принятых параметров проекта (геометрия, сечения конструктивных элементов, свойства материалов и соединений, величины и сочетания нагрузок и воздействий) состояние несущих стальных конструкций Театра оперы и балета удовлетворяет нормативным критериям механической безопасности (деформативности, прочности и устойчивости). Коэффициент использования конструктивных элементов купола < 1 (подробнее в [Error! Reference source not found.]). Коэффициент запаса общей устойчивости стальных несущих конструкций > 1.3 (по СП 16.13330.2017 [30]).

7.5. Проведены расчеты на устойчивость к прогрессирующему обрушению стальных несущих конструкций Театра оперы и балета, а также проведен анализ проектных расчетов. Устойчивость стальных несущих конструкций к прогрессирующему обрушению обеспечивается, что подтверждается выполненными расчетами.

7.6. Принятые принципиальные конструктивные решения несущих стальных конструкций Театра оперы и балета в г. Калининград, в части обеспечения несущей способности и механической безопасности, соответствуют требованиям действующих норм и подтверждаются проведенными расчетами.

8. Конструктивные узлы

8.1. В ходе НТС выполнено уточненное расчетное конечноэлементное исследование трехмерного напряженно-деформированного состояния узла крепления ферм к центральной

колонне при основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий (с учетом эффектов физической нелинейности в верифицированном ПК ANSYS Mechanical) [Error! Reference source not found.]. Согласно результатам выполненных расчетов и сопоставительного анализа с результатами проектных расчетов в ПК IDEA Statica, рассмотренный конструктивный узел отвечает требованиям [Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.] по прочности при действии основных и особых сочетаний нагрузок и воздействий.

8.2. Рассмотрены и проанализированы расчеты узла (и его отдельных элементов) крепления верхнего пояса треугольной фермы по оси П. Согласно представленным численным исследованиям и расчетам по нормативным методикам [Error! Reference source not found.] несущая способность данного узла (и его отдельных элементов) обеспечена при основных и особых (включая сейсмическое уровня КЗ) сочетаниях нагрузок и воздействий.

8.3. Так же проанализированы результаты расчетного обоснования узла крепления раскосов к нижнему поясу фермы покрытия. Проведена оценка сварных и болтовых соединений по нормативной методике. Прочность рассматриваемого конструктивного узла подтверждена расчетными исследованиями.

8.4. Выполнены расчеты на локальную устойчивость тонкостенного сечения арок в физически и геометрически нелинейной постановке. Подтверждена их устойчивость к местной потере устойчивости при принятых в проекте свойствах материалов, нагрузках и конструктивных решениях.

9. Фасадные конструкции

9.1. В рамках НТС проведен анализ расчетного обоснования фасадных систем (нескольких типов) на основное и особое сочетание нагрузок и воздействий [Error! Reference source not found.].

9.2. Подтверждено соответствие разработанных расчетных моделей принятым конструктивным решениям и отсутствие необоснованных упрощений расчетных моделей, способных значительно повлиять на результаты расчетного обоснования.

9.3. Для расчета фасадных систем на сейсмическое воздействие линейно-спектральным методом подготовлены спектры реакции, полученные из ответных расчетных акселерограмм в точках крепления фасадных систем. Ответные акселерограммы получены в результате расчета системы «основание - конструкции Театра» прямым динамическим методом с интегрированием по времени.

9.4. Отдельно (в рамках локальной модели) проведен расчет на основное и особое (сейсмическое сочетание) сочетание нагрузок и воздействий крепления фасадных систем к гипару (п.2 [Error! Reference source not found.]). Механическая безопасность фасадных систем гипара обеспечивается.

9.5. Отдельно (в рамках локальной модели) проведен расчет на основное и особое (сейсмическое сочетание) сочетание нагрузок и воздействий фасадных стен (п.3 [Error! Reference source not found.]). По результатам проведенных расчетов механическая безопасность фасадных систем гипара обеспечивается.

9.6. Конструктивные решения несущих элементов фасадов достаточны для обеспечения требований механической прочности, устойчивости, геометрической неизменяемости и надежности конструкций фасадов.

10. Из вышеизложенного следует, что результаты выполненного комплексного научно-технического сопровождения проекта, включая альтернативные и уточненные расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, динамических характеристик, устойчивости и нормативные оценки несущей способности, являются

достоверным обоснованием механической безопасности принятых конструктивных решений для Театра оперы и балета в г. Калининград.