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. №05-П-10/21/1

"Утверждаю"
Генеральный директор ЗАО НИЦ СтаДиО

_____ ***А.М. Белостоцкий***
"_____"_____2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по научно-техническому сопровождению проектирования Объекта: «Реконструкция Петербургского спортивно-концертного комплекса, расположенного по адресу: Российская Федерация, Санкт-Петербург, муниципальный округ Гагаринское, …, в целях создания многофункционального спортивно-досугового комплекса»

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

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

1. Краткая характеристика спортивно-концертного комплекса

Объект проектирования – «Реконструкция Петербургского спортивно-концертного комплекса, расположенного по адресу: Российская Федерация, Санкт-Петербург, муниципальный округ Гагаринское, пр. Юрия Гагарина, д. 8, кадастровый номер 78:14:0007633:3082, в целях создания многофункционального спортивно-досугового комплекса» можно условно разделить на несколько отдельных элементов, которые требуют рассмотрения в рамках научно-технического сопровождения.

1. Конструкции декоративного козырька, не связанные с основными конструкциями комплекса.
2. Конструкции основной части здания комплекса (14 секторов), включая стальной купол основного покрытия и малые покрытия над большой и малой ледовыми аренами, а так же бассейном, спортзалом и VIP-проездом.
3. Витражные и ограждающие конструкции.

1.1. Конструкции декоративного козырька

Покрытие.

Покрытие состоит из 66 стропильных ферм, соединенных между собой системой горизонтальных и вертикальных связей. Фермы покрытия имеют изогнутую форму верхнего пояса, которая образована прямолинейными сегментами с изменяющимся уклоном в местах сопряжения с раскосами. Конструкция покрытия в плане выполнена в форме С-образного кольца с переменными радиусами кривизны. Внутренний радиус кольца равен 92,7 м, внешний радиус кольца переменный, в основной части равен 139,5м. Каждая ферма покрытия опирается шарнирно на 2 точки, и имеет 2 консольных участка, к каждой точки опоры фермы подходят от 2-х до 4-х колонн. Опирание ферм на колонны шарнирное.

Колонны.

Колонны козырька состоят из 2х ярусов, нижнего и верхнего, на нижний ярус колонн опирается С-образный пояс, проходящий через всю конструкцию декоративного козырька. Сам нижний ярус колонн опирается на фундаменты. На каждый фундамент опираются от 1-й до 6-ти колонн. На верхний ярус колонн опираются конструкции покрытия, а сам верхний ярус колонн опирается под разными углами на нижний ярус колонн в местах примыкания С-образного пояса. Сопряжение колонн с фундаментом-шарнирное, сопряжение колонн с арками шарнирное.

С-образный пояс.

С-образный пояс проходит через все колонны декоративного козырька и имеет волнообразную форму по высоте. Конструкции пояса представляют собой систему распорок и горизонтальных связей между колоннами. В местах примыкания колонн к поясу, колонны меняют свой угол. Закрепление элементов пояса к колоннам принято шарнирным. Элементы пояса выполнены из труб прямоугольного сечения.

Арки над входами на трибуны.

Конструкции арок образованы ферменными конструкциями, пояса ферм арок не параллельны друг другу, расстояние между поясами арок переменное. Арки опираются на фундаменты двумя краями, один из которых является неподвижной шарнирной опорой, а второй подвижной шарнирной опорой. На арки опираются колонны нижнего яруса. Крепление колонн к аркам принято шарнирным.

Фундаменты.

Фундаменты под опоры декоративного козырька запроектированы свайными с объединением оголовков свай монолитными железобетонными ростверками. Проектом предусмотрено устройство буронабивных висячих свай Ø800 мм длиной 34,10 м. Сваи

выполняются с относительной отметки -2,900 м под защитой извлекаемых обсадных труб Ø800х40 мм. Узел сопряжения свай с ростверками запроектирован жестким.

1.2. Конструкции основной части здания комплекса (14 секторов, включая купол и малые покрытия)

Здание отдельно стоящее, 7-ми этажное с 2-мя подземными этажами, круглой формы в плане, габариты здания в осях - 282,0м х 246,0м. Здание разделено деформационными швами на отдельные 14 секторов. Конструктивная схема здания — каркасно-стеновая с несущими монолитными железобетонными колоннами и стенами.

Объект капитального строительства предусмотрен в монолитном железобетоне, покрытия над большой и малой ледовыми аренами, а так же бассейном, спортзалом и VIP-проездом предусмотрены с применением стальных ферм.

Колонны надземной части круглого (ø900 мм) и прямоугольного (в секторах 1-3, 10 - 600х600 мм и 600х900 мм, в секторах 4-9 – 600х900 мм, 600х1200 мм, 900х900 мм,1200х1200 мм) сечений.

Стены надземной части - монолитные железобетонные толщиной 300, 400 мм, стены лифтовых шахт, лестничных клеток – 200, 250, 300 мм

Перекрытия и покрытия (за исключение большепролетного) - монолитные железобетонные, в секторах 4-14 толщиной 300 мм, плиты покрытия 7-го этажа в секторах 4-9 толщиной 250 мм, в секторах 1-3 толщиной 250 мм, образованные гладкими плитами, которые жестко сопрягаются с поддерживающими их колоннами посредством капителей.

Купол.

Большепролетное покрытие имеет пролет 113.5 м, представляет собой пространственную стержневую систему со связями из труб круглого сечения. Геометрия конструкции крыши в плане близкая к овалу, с расстояниями от центра до вершины 56,7 м и 71,7 м. Система несущих конструкций состоит из 20 плоских ферм, которые опираются на 48 металлических колонн. Опирание ферм на колонны без связей является шарнирно-подвижным, опирание ферм на колонны, раскрепленные вертикальными связями, является шарнирно-неподвижным. Возможность свободного перемещения фермы относительно колонны в плане обеспечивается применением сферических подвижных опор.

1.3. Витражные и ограждающие конструкции

Для устройства светопрозрачных конструкций применена самонесущая сетчатая структурная конструкция «SpaceStructure», состоящая из алюминиевых стержневых элементов и алюминиевых узловых элементов. Для придания конструкции формы в узловом элементе выполняются площадки, скоординированные в трех плоскостях и отверстия с резьбой под болты. Стержневые элементы конструкции выполнены из профильной алюминиевой трубы прямоугольного сечения 210×75мм и трубы 100×75×4мм по ГОСТ 4784-2019, сплав 6063Т66 по ГОСТ 22233-2008, узловые элементы из алюминиевого кругляка по ГОСТ 21488-97, сплав Д16Т по ГОСТ 4784-2019 (для узлов поперечным габаритом до 250 мм), сплав Д16 по ГОСТ 4784-2019 (для узлов поперечным габаритом более 250 мм). Часть стержневых элементов (см. ниже схему расположения) выполняются из сплава АД35Т1 по ГОСТ 8617-2018. Стержни крепятся нержавеющими болтами по расчету (М20) по ГОСТ 11738-84 к узловому элементу. Согласно п.5.8 СП 128.13330.2016 применение винтов из нержавеющей стали допускается без применения дополнительных мероприятий по защите от контактной коррозии. Для закручивания болтов в стержнях предусмотрены технологические отверстия со стороны стеклопакета и со стороны помещения. Все профили имеют сертификаты соответствия.

Сетчатая структурная конструкция запроектирована таким образом, что представляет собой набор треугольных/прямоугольных сегментов размером до 2,5×5 м. Общие размеры конструкции в плане: диаметр 182, высота конструкции до 29 м. Базы конструкций являются шарнирными (без передачи изгибающих моментов на нижележащие конструкции), в верхней части фасада при основных ветровых нагрузках базы выполняются перемещаемыми в вертикальной плоскости. Для уменьшения усилий в стержневых элементах по горизонтали выполняются компенсаторы (температурные разрывы). Фасадная система разделена на 6 температурных блоков.

1.1. Оценка устойчивости железобетонных конструкции (в том числе трибун) к прогрессирующему обрушению

В рамках научно-технического сопровождения проведены расчеты на устойчивость к прогрессирующему обрушению железобетонных конструкций в физически нелинейной постановке (приложение 15 настоящего Заключения) и проанализированы расчеты, выполненные в линейной, статической постановке, в соответствии с положениями СП385 [**Error! Reference source not found.**]. Рассмотрено 85 сценариев локального разрушения.

По результатам расчетов на устойчивость к прогрессирующему обрушению принято дополнительное армирование:

- для участков плит перекрытий, расположенных над удаляемым конструктивным элементом;
- для участков плит перекрытий в зоне соседних вертикальных элементов (колонн и стен).

Проведен анализ изменений в распределении усилий в несущих железобетонных элементах (от изменения снеговых и ветровых нагрузок и ряда локальных конструктивных изменений) показал ожидаемое, незначительное изменение картины НДС железобетонных конструкций (сектора 1-14) и говорит об отсутствии необходимости кардинального пересмотра результатов расчетов на прогрессирующее обрушение, полученных ранее.

На основании проведенных расчетов и с учетом принятого дополнительного армирования устойчивость железобетонных конструкций здания к прогрессирующему обрушению обеспечена.

Проведены расчетные исследования на устойчивость к прогрессирующему обрушению стальных конструкций малых покрытий согласно требованиям СП385 [26]. Подробный графический материал представлен в расчетном обосновании [**Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**].

1.2. Оценка возможности возникновения резонансного возбуждения конструкций трибун от синхронного согласованного движения зрителей

При проектировании конструкций трибун необходимо исключить возможность их резонансного возбуждения, от синхронного движения людей. 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.**] оценка возможности возникновения резонанса от согласованного действия толпы проводится путем анализа собственных частот и форма колебания гребенки трибун и сопоставление 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.

Модальный анализ (определение собственных форм и частот колебаний) элементов трибун проводится с учетом масс от собственного веса, постоянной нагрузки, но без учета полезной нагрузки (ввиду неопределенности этого параметра). В рамках расчетного обоснования элементов трибун [**Error! Reference source not found.**] проведено определение динамических характеристик элементов трибун и низшая частота горизонтальных (рис. 5.1) колебаний равна 8.321 Гц (таблица 1), что значительно выше критериального значения - 3 Гц.

Таблица 1

Собственные частоты колебаний элемента гребенки трибун

№ загруж	№ формы	Собст.значения	Частоты		Период (с)	Коэф.распред.	Мод.масса (%)	Сумма мод.масс (%)
			Круг.частота (рад/с)	Частота (Гц)				
4	1	0,019	52,285	8,321	0,120	0,716	9,401	9,401
4	2	0,008	120,942	19,249	0,052	- 1,348	34,836	44,237
4	3	0,005	218,444	34,766	0,029	- 0,010	0,002	44,238
4	4	0,002	411,623	65,512	0,015	- 0,360	0,146	44,384
4	5	0,002	449,145	71,484	0,014	- 0,494	5,110	49,494
4	6	0,002	498,105	79,276	0,013	0,309	0,938	50,432
4	7	0,002	613,724	97,677	0,010	- 1,250	28,459	78,891
4	8	0,001	806,229	128,315	0,008	- 0,417	0,215	79,106
4	9	0,001	875,441	139,331	0,007	0,043	0,006	79,112
4	10	0,001	921,377	146,642	0,007	0,937	4,201	83,312
4	11	0,001	1254,399	199,644	0,005	- 0,464	0,278	83,591

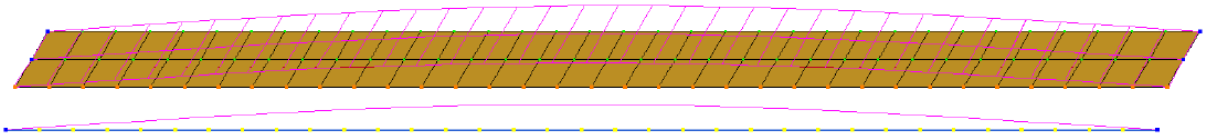


Рис. 1.1 Низшая (горизонтальная) форма колебаний элемента гребенки трибун

Согласно примечанию к табл.8.3 СП 20.13330.2016 [**Error! Reference source not found.**] при проектировании трибун необходимо учитывать динамическое воздействие с частотой 2 Гц. Исходя из того, что низшие собственные частоты колебаний гребенки трибун

значительно выше 2 Гц (см. рис.5.1) резонансные явления от такого воздействия возникнуть не могут.

2. Конструкции металлические основной крыши (купола)

2.1. Сопоставление альтернативных расчетов стальных конструкций купола

В рамках научно-технического сопровождения проектирования Объекта «Реконструкция Петербургского спортивно-концертного комплекса» проведен анализ проектной документации по конструкциям основной крыши (купола) [**Error! Reference source not found.**].

Расчетное обоснование принятых конструктивных решений по металлоконструкциям купола проводились по независимо разработанным конечноэлементным моделям в различных программных комплексах независимыми коллективами:

1) ЗАО НИЦ СтаДиО, с реализующим программным комплексом – ПК SCAD OFFICE [**Error! Reference source not found.**];

2) ООО «Маффейс Инжиниринг» с реализующим программным комплексом – ПК SAP2000 [**Error! Reference source not found.**].

Анализ проектной документации по стальным конструкциям купола показал соответствие принятых конструктивных решений действующим нормативным документам, а принятые в расчетном обосновании постановка, граничные условия и методы оценки несущей способности позволяют достоверно оценить напряженно-деформированное состояние фасадных конструкций.

Несущая способность стальных конструкций купола обеспечена.

Сопоставительный анализ альтернативных расчетов включает:

- сопоставление основных параметров (прежде всего, нагружающих факторов) расчетных моделей;
- сопоставление результатов модального (значимые собственные частоты и формы колебаний) анализа конструкций;
- сопоставление результатов статического анализа на основное сочетание нагрузок, включая графический материал;

Сопоставительный анализ результатов расчетов показал разницу по основному набору критериев не превышающую 5%, а максимальные расхождения не превышают 13%.

На основании сравнительного анализа делается вывод о том, что результаты выполненных альтернативных расчетов и нормативных оценок несущей способности являются надежным расчетно-теоретическим обоснованием механической безопасности конструкций основной крыши (купола) Петербургского спортивно-концертного комплекса.

Подробные результаты альтернативного обоснования приведены в научно-техническом отчете [**Error! Reference source not found.**].

Сопоставительная таблица параметров расчетных моделей и результатов расчетов стальных конструкций купола, выполненных в ПК SCAD OFFICE и ПК SAP2000

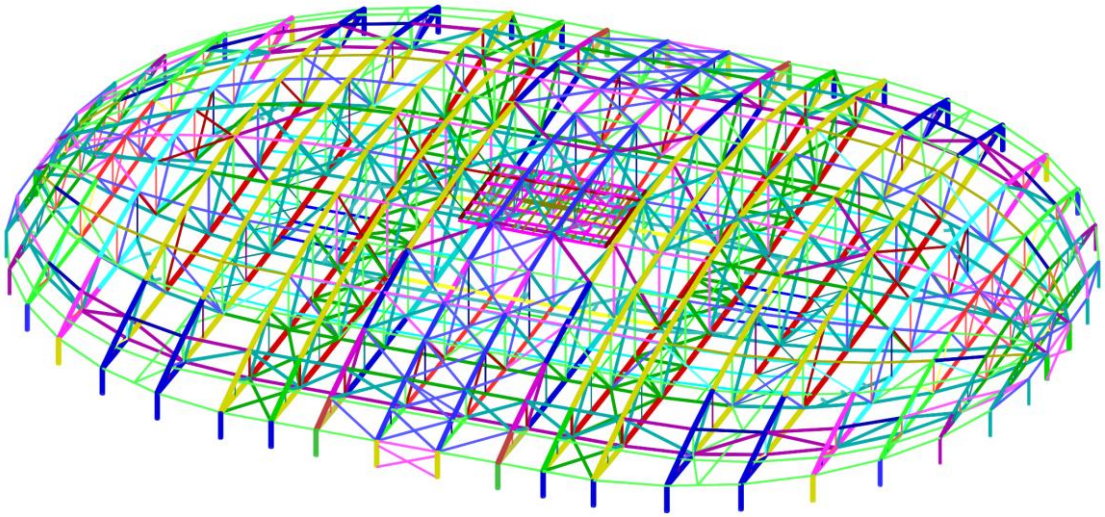
Наименование параметра	ЗАО НИЦ СтаДиО Значение параметра ПК SCAD	ООО «Маффейс Инжиниринг»» SAP2000	δ, %
Суммарные реакции			
Собственный вес конструкций купола (с учетом конструктивного коэффициента и коэффициента надежности по нагрузке γ_f), т	2752.5	2746.7	0.2
Суммарная реакция от всех нагрузок типа SW с учетом конструктивного коэффициента и коэффициента надежности по нагрузке γ_f), т	3291.2	3292.3	0.0
Суммарная реакция постоянных, длительных и полезных расчетных нагрузок, т Расчетная комбинация: 1*SW_соб_вес + 1*SW_purlin_прогоны + 1*SDL_1_2_3 + 1*SDL_5A + 1*SDL_5C + 1*SDL_walkways + 1*LL_4A + 1*LL_4B + 1*LL_6 + 1*LL_7 + 1*LL_7A + 1*LL_8_1	5362.8	5457.7	1.7
Собственные частоты и формы сооружения (с учетом только собственного веса, без учета коэффициентов надежности по нагрузке и ответственности)			
1-я собственная частота, Гц	0.517	0.507	1.9
2-я собственная частота, Гц	0.602	0.554	8.0
3-я собственная частота, Гц	0.742	0.729	1.8
4-я собственная частота, Гц	1.2	1.172	2.3
5-я собственная частота, Гц	1.224	1.217	0.6
Параметры НДС металлических конструкций купола			
Максимальные вертикальные перемещения купола от постоянных и длительных нормативных нагрузок по оси Z, мм	223	221	0.9
Максимальные вертикальные перемещения купола от нормативной снеговой нагрузки (вариант 1) по оси Z, мм	79	78	1.3

Наименование параметра	ЗАО НИЦ СтаДиО Значение параметра ПК SCAD	ООО «Маффейс Инжиниринг»» SAP2000	δ, %
Максимальные вертикальные перемещения купола от нормативной снеговой нагрузки (вариант 1) по оси X, мм	12.5	11	12.0
Максимальные вертикальные перемещения купола от нормативной снеговой нагрузки (вариант 1) по оси Y, мм	11.5	10	13.0
Макс. продольные усилия конструкций купола N, т	-1246.1	-1303	4.6
	1438.7	1493	3.6
Макс. продольные усилия опорных колонн N, т	-529	-545	3.0
Параметры НДС металлических конструкций ферм при нормативном сочетании постоянных и длительных нагрузок. Использованы огибающие значения по нормативным длительным нагрузкам			
Ферма А10-А13, мм	319	322	0.9
Ферма А11-А12, мм	358	369	3.0
Ферма А9-А14, мм	304	309	1.6
Ферма А8-А15, мм	283	289	2.1
Ферма А7-А16, мм	248	258	3.9
Ферма А6-А17, мм	207	228	9.2

Ниже приведен сбор масс для модального анализа

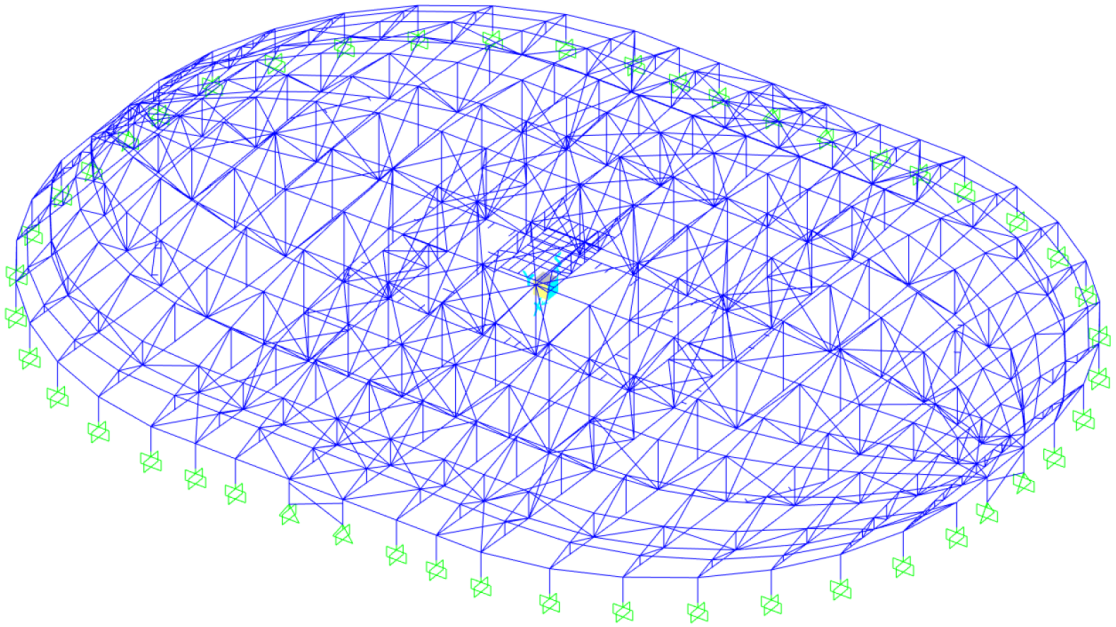
	Загружение	Сумм. расчетное значение, т	Коэффициент преобразования
1	SW_соб_вес	2752.5	0.952
2	SW_purlin_прогоны	538.7	0.952
3	SDL_1_2_3	1146.5	0.952
4	SDL_5A	3.8	0.952
5	SDL_5C	27.9	0.952
6	SDL_walkways	226.8	0.952
7	LL_4A	15.9	0.833
8	LL_4B	4.1	0.833
9	LL_6	3.8	0.833
10	LL_7	73.8	0.833
11	LL_7A	71.2	0.833
12	LL_8_1	497.8	0.833

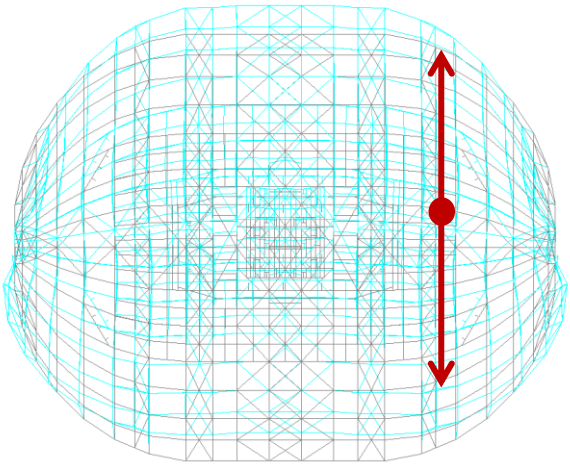
ЗАО НИЦ СтаДиО
ПК SCAD OFFICE

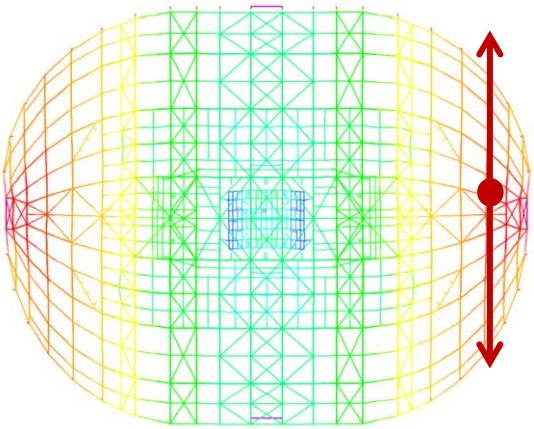


1	100 * 220	03_Тр_220x100x4	127
2	130 * 260	03_Тр_260x130x6	168
3	240 * 260	10_Тр_260x240x8	32
4	300 * 300	83_Dk_30K2	182
5	398 * 394	83_Dk_40K1	12
6	150 * 300	93_Db_30B2	107
7	168 * 160	GOST_168x4	4
8	168 * 156	GOST_168x6	134
9	193.7 * 181.7	GOST_193.7x6	20
10	219 * 207	GOST_219x6	16
11	219 * 203	GOST_219x8	76
12	219 * 199	GOST_219x10	24
13	273 * 261	GOST_273x6	250
14	273 * 253	GOST_273x10	28
15	325 * 309	GOST_325x8	138
16	325 * 305	GOST_325x10	112
17	325 * 301	GOST_325x12	39
18	325 * 293	GOST_325x16	20
19	426 * 410	GOST_426x8	226
20	426 * 402	GOST_426x12	366
21	426 * 398	GOST_426x14	12
22	426 * 394	GOST_426x16	92
23	530 * 510	GOST_530x10	52
24	530 * 502	GOST_530x14	46
25	530 * 490	GOST_530x20	44
26	630 * 602	GOST_630x14	32
27	630 * 598	GOST_630x16	40
28	630 * 590	GOST_630x20	28
29	720 * 692	GOST_720x14	156
30	720 * 684	GOST_720x18	148
31	720 * 680	GOST_720x20	16
32	720 * 676	GOST_720x22	36
33	720 * 670	GOST_720x25	96
34	720 * 664	GOST_720x28	8
35	720 * 660	GOST_720x30	4
36	720 * 656	GOST_720x32	8
37	720 * 648	GOST_720x36	8
38	300 * 300		237
39	500 * 460	500x20_вспом_св	44
40	500 * 460	GOST_500x20	16

ООО «Несущие системы»
ПК SAP2000

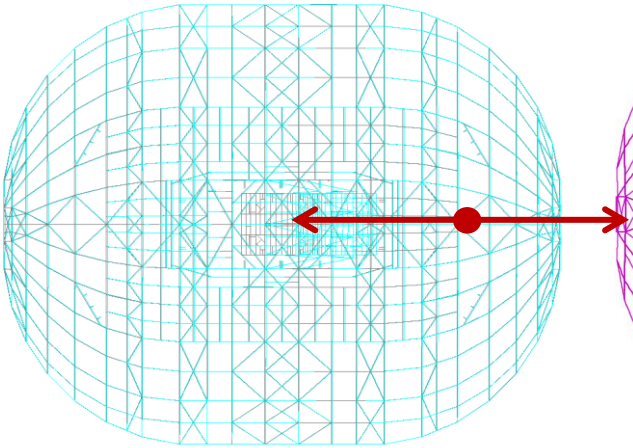


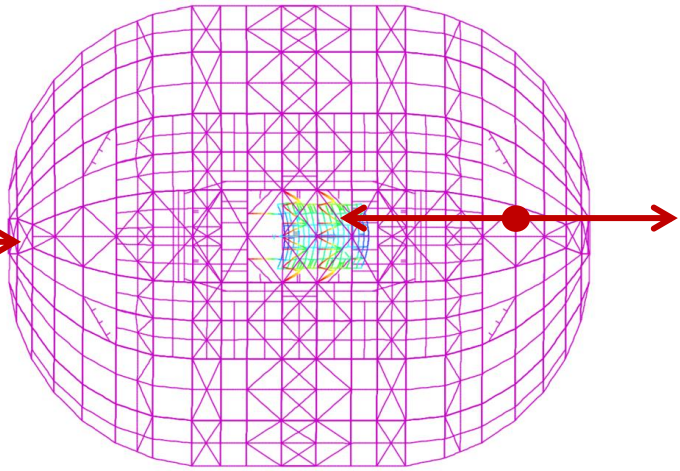




ЗАО НИЦ СтаДиО. ПК SCAD, f_1 = 0.517 Гц SAP2000, f_1 = 0.51

Сопоставление 1-й формы колебаний

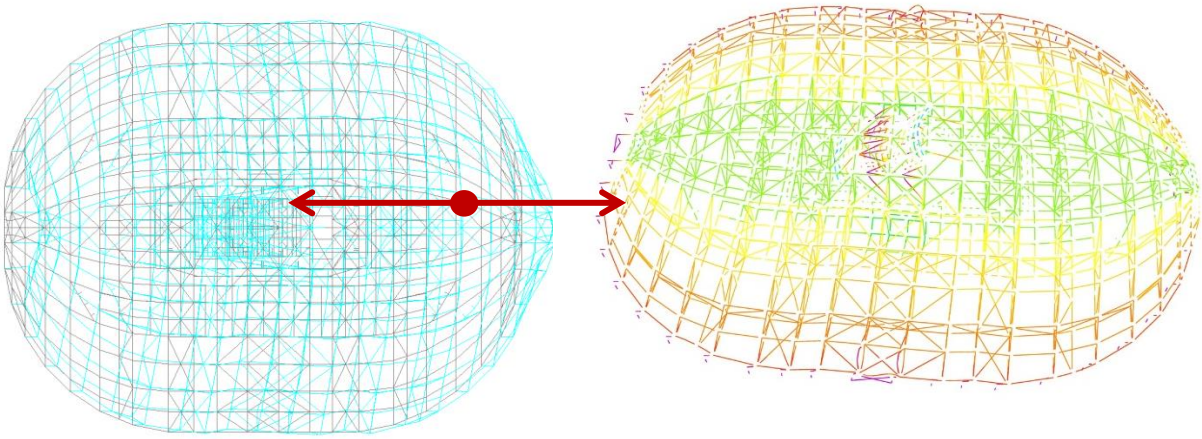




(колебания технологической площадки)

ЗАО НИЦ СтаДиО. ПК SCAD, f_2 = 0.602 Гц SAP2000, f_2 = 0.55 Гц

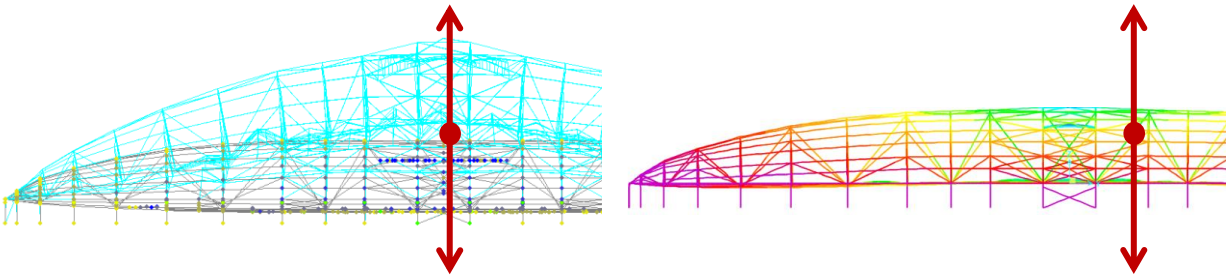
Сопоставление 2-й формы колебаний



ЗАО НИЦ СтаДиО. ПК SCAD, f_3 = 0.742 Гц

SAP2000, f_3 = 0.73 Гц

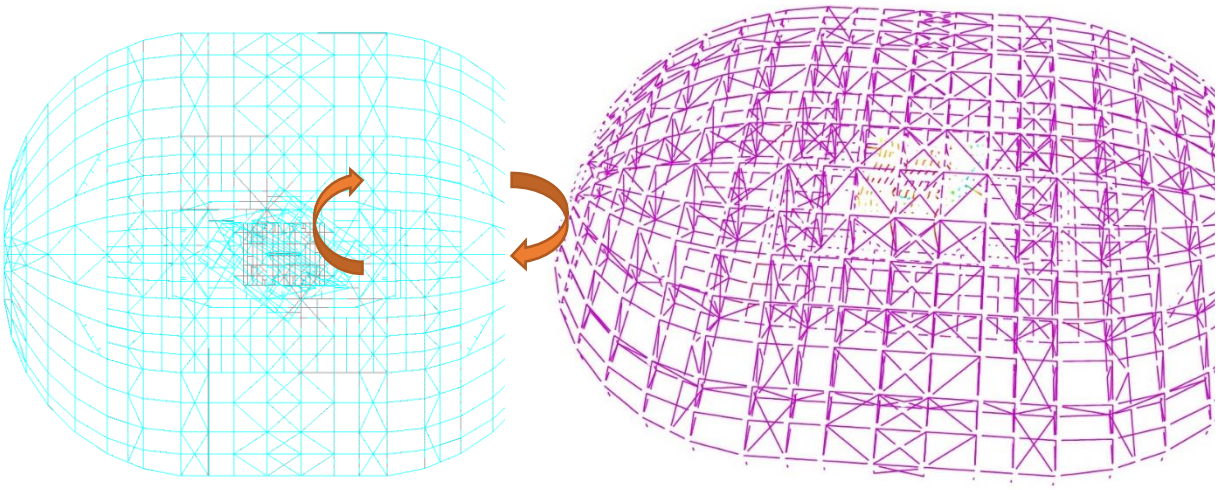
Сопоставление 3-й формы колебаний



ЗАО НИЦ СтаДиО. ПК SCAD, f_4 = 1.20 Гц

SAP2000, f_4 = 1.17

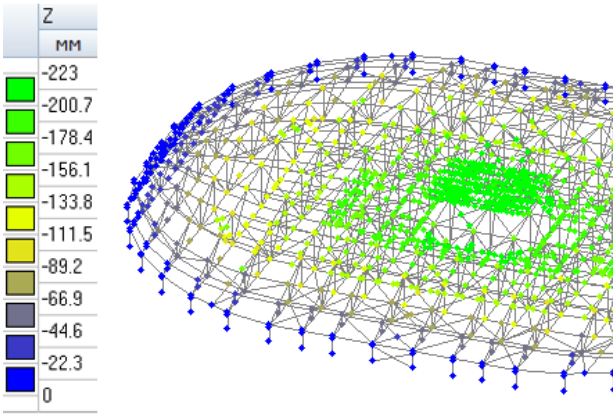
Сопоставление 4-й формы колебаний



ЗАО НИЦ СтаДиО. ПК SCAD, f_5 = 1.224 Гц

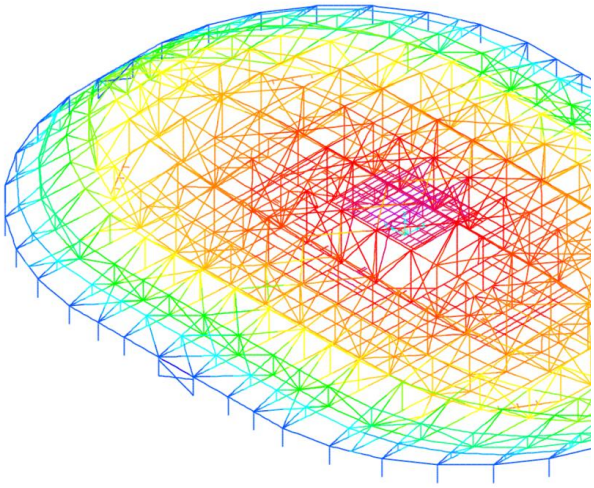
SAP2000, f_5 = 1.217 Гц

Сопоставление 5 формы колебаний



u_max = 223 мм

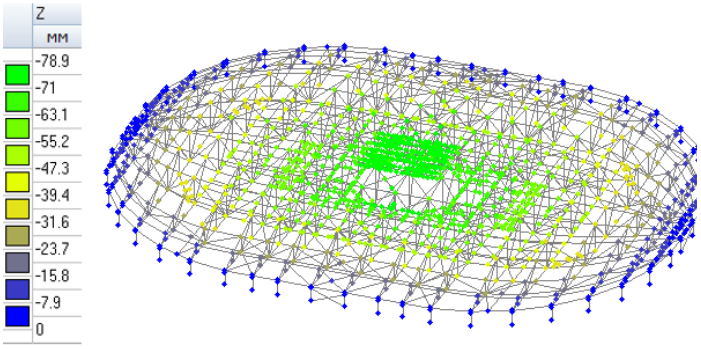
ЗАО НИЦ СтаДиО. ПК SCAD



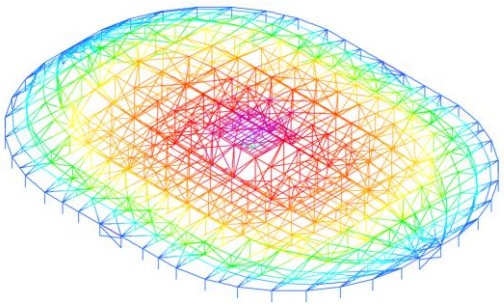
u_{max} = 221 мм

SAP2000 (л. 270 [**Error! Reference source not found.**])

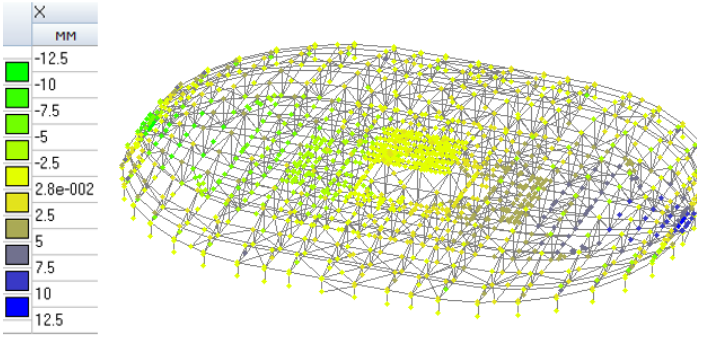
Прогибы от постоянных и длительных нагрузок (SW, SDL)



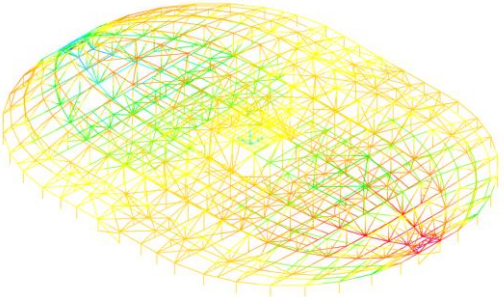
Z; u_{Zmax} = 79 мм



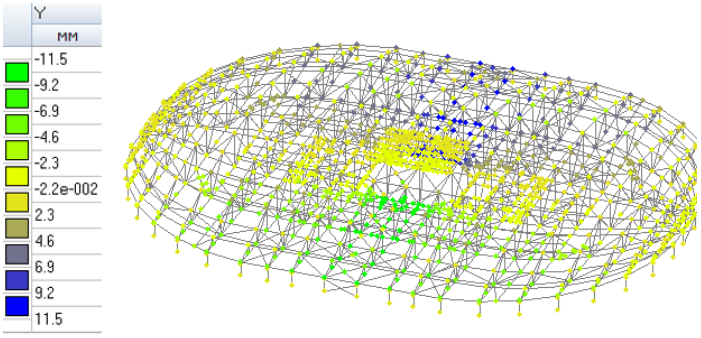
Z; u_{Zmax} = 78 мм



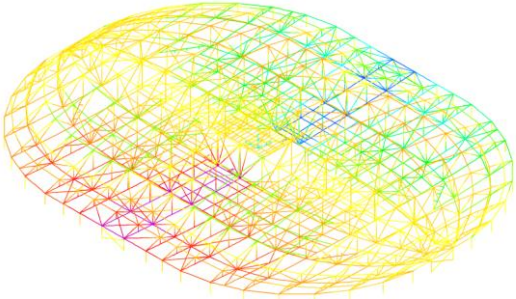
X; u_{Xmax} = 12.5 мм



Y; u_{Ymax} = 11 мм



Y; u_{Ymax} = 11.5 мм

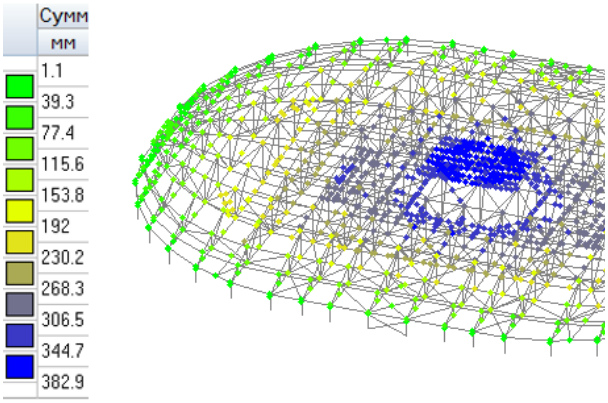


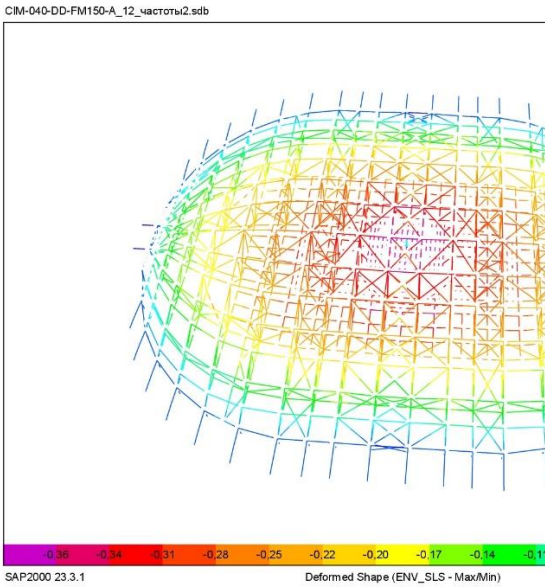
X; u_{Xmax} = 10 мм

ЗАО НИЦ СтаДиО. ПК SCAD

SAP2000 (л. 23, л. 271 [**Error! Reference source not found.**])

Прогибы от нормативной снеговой нагрузки SL_1



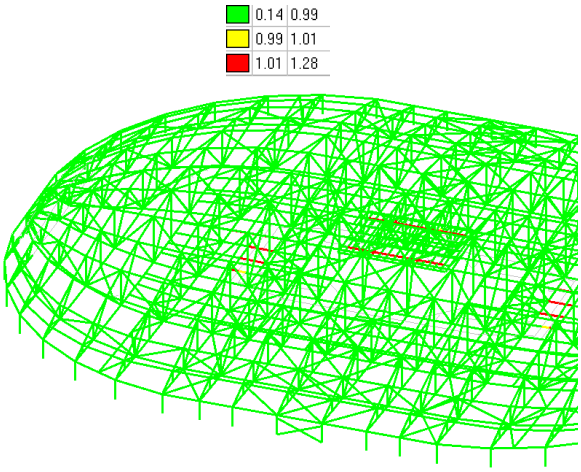


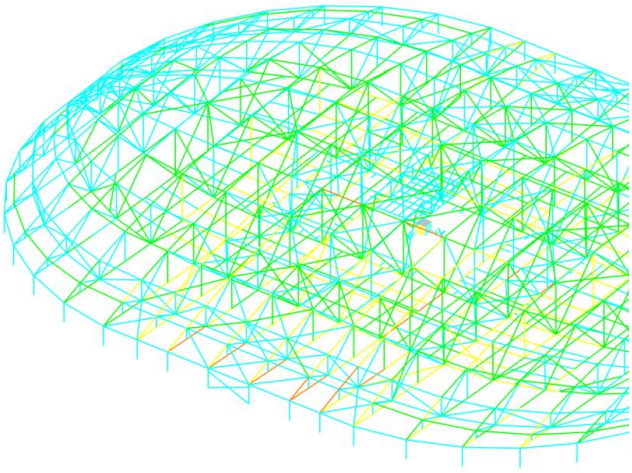
ЗАО НИЦ СтаДиО. ПК SCAD, 383 мм

SAP2000, 390мм

Прогибы (абсолютные огибающие значения) от нормативных длительных нагрузок

Результаты проверки сечений приведены для рабочей конфигурации модели.





$k_{max} = 0.95$

ЗАО НИЦ СтаДиО. ПК SCAD

SAP2000

Сопоставление коэффициентов использования

3. Выводы

По результатам комплекса научно-исследовательских работ, выполненных в рамках научно-технического сопровождения проектной документации Объекта «Реконструкция Петербургского спортивно-концертного комплекса, расположенного по адресу: Российская Федерация, Санкт-Петербург, муниципальный округ Гагаринское, пр. Юрия Гагарина, д.8, кадастровый номер 78:14:0007633:3082, в целях создания многофункционального спортивно-досугового комплекса» можно сделать следующие выводы.

1. Проведен всесторонний анализ проектной документации, включая изысканий и материалы расчетного обоснования. 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.**, **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**]. Конструктивные решения, принятые при проектировании, соответствуют действующим нормам, а технические решения по требованиям, не регламентированным российскими нормативными документами, приняты с надлежащим обоснованием.

2. В рамках научно-технического сопровождения проектной документации проведены комплексные аэродинамические исследования Объекта (с учетом окружающей застройки) на основании численного решения трехмерных задач аэродинамики [6].

2.1. 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 [12, 14-19].

2.2. Определены пиковые ветровые давления на ограждающие (фасадные) конструкции Объекта, которые использованы при их расчетном обосновании [13, 18].

2.3. На основе синтеза численных и нормативных методик определены расчетные значения снеговых нагрузок [6].

2.4. Определен уровень ветровой комфортности с обоснованием обеспечения комфортности пешеходных зон объекта [6]. Ветровая комфортность пешеходных зон обеспечена.

2.5. Оценены возможности возникновения аэроупругой неустойчивости отдельных элементов декоративного козырька [6]. Возможность возникновения эффектов галопирования для Декоративного козырька исключается.

2.6. Проведен сопоставительный анализ результатов физического и математического моделирования ветровых и снеговых нагрузок (Приложение 16 настоящего заключения). Для расчетного обоснования рекомендуется применять результаты и физического, и математического моделирования.

3. 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 (декоративного козырька, железобетонных и стальных конструкций секторов 1-14, стального купола, фасадных систем), проведено сопоставление результатов альтернативных («параллельных») расчетов и подтверждено их приемлемое соответствие по основным критериальным параметрам.

4. По результатам проведенного анализа подтверждено соответствие расчетных моделей «Маффейс Инжиниринг», разработанным в Sap2000 [**Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**], моделей ООО «Союз Проект» в ЛИРА-САПР [**Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**] и моделей ООО «Несущие системы» в SCAD OFFICE [**Error! Reference source not found.**], принятым конструктивным решениям и отсутствие необоснованных упрощений расчетных моделей, способных значимо повлиять на результаты расчетного обоснования.

5. *Декоративный козырек*

5.1. В ходе НТС разработаны и верифицированы в ПК ANSYS Mechanical и ЛИРА-САПР пространственные конечноэлементные модели декоративного козырька, адекватно отражающие их геометрико-жесткостные, инерционные и нагрузочные характеристики и результирующее напряженно-деформированное состояние, параметры прочности, устойчивости и динамики. Анализ результатов расчетных исследований показал в целом непротиворечивую картину распределения параметров НДС в несущих конструкциях декоративного козырька.

5.2. Проведен сопоставительный анализ альтернативных расчетов [**Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**] конструкций декоративного козырька, результаты находятся в приемлемом соответствии.

5.3. Выполненными расчетными исследованиями установлено, что при соблюдении принятых параметров проекта (геометрия, сечения конструктивных элементов, свойства материалов и соединений, величины и сочетания нагрузок и воздействий) состояние несущих конструкций декоративного козырька удовлетворяет нормативным критериям механической безопасности (деформативности, прочности и устойчивости). Коэффициент использования конструктивных элементов декоративного козырька < 1 (подробнее в [**Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**]).

5.4. По результатам рабочих совещаний, инициированных по результатам НТС, проведен ряд дополнительных уточненных расчётных исследований по оценке местной устойчивости тонкостенных элементов декоративного козырька. В рамках нелинейных расчетов отдельных (наиболее нагруженных) конструктивных элементов подтверждена их локальная устойчивость (подробнее в [**Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**]).

5.5. Согласно проведенным нелинейным динамическим расчетам на прогрессирующее обрушение (для 10-ти представительных сценариев инициирующего локальных разрушений) подтверждена устойчивость козырька к прогрессирующему обрушению [**Error! Reference source not found.**].

5.6. Выполнено уточненное расчетное конечноэлементное исследование трехмерного напряженно-деформированного состояния наиболее сложного конструктивного узла при основных сочетаниях нагрузок и воздействий (с учетом эффектов физической нелинейности в верифицированном ПК ANSYS Mechanical) [20]. Согласно результатам выполненного расчетного анализа рассмотренный конструктивный узел отвечают требованиям [24, 25, 28] по прочности при действии основных сочетаний нагрузок и воздействий.

5.7. Проанализированы результаты расчетного обоснования ряда конструктивных узлов декоративного козырька [**Error! Reference source not found.**]. Проведены оценки сварных и болтовых соединений по нормативной методике. Прочность рассматриваемых конструктивных узлов подтверждена расчетными исследованиями.

5.8. Механическая безопасность конструкций декоративного козырька подтверждается проведенными расчетными исследованиями.

6. *Конструкции секторов 1-4*

6.1. Разработаны и верифицированы в ПК SCAD OFFICE пространственные конечноэлементные модели железобетонных и стальных конструкций секторов 1-14, адекватно отражающие их геометрико-жесткостные, инерционные и нагрузочные характеристики и результирующее напряженно-деформированное состояние, параметры прочности, устойчивости и динамики.

6.2. Проведен сопоставительный анализ альтернативных расчетов [**Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**] железобетонных и стальных конструкций секторов 1-14, достигнуто приемлемое соответствие.

6.3. Выполненными расчетными исследованиями установлено, что при соблюдении принятых параметров проекта (геометрия, сечения конструктивных элементов, свойства материалов и соединений, величины и сочетания нагрузок и воздействий) состояние несущих конструкций секторов 1-14 удовлетворяет нормативным критериям механической безопасности (деформативности, прочности и устойчивости). Критериальные значения кинематических параметров несущих конструкций (осадки, прогибы плит перекрытий, покрытия, горизонтальные перемещения) находятся в диапазоне нормативно-регламентированных величин, коэффициент использования конструктивных элементов секторов 1-14 (включая малые покрытия) < 1 (подробнее в [**Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**]).

6.4. В рамках научно-технического сопровождения проведены расчеты на устойчивость к прогрессирующему обрушению железобетонных конструкций в физически нелинейной постановке и стальных конструкций малых покрытий согласно требованиям СП385 [**Error! Reference source not found.**], проанализированы результаты основного расчетного обоснования [**Error! Reference source not found.**]. Устойчивость конструкций секторов 1-14 к прогрессирующему обрушению обеспечивается.

6.5. Проведена оценка возможности возникновения резонансного возбуждения конструкций трибун от синхронного согласованного движения зрителей. Критерии по низшим собственным частотам колебаний (< 3 и 5 Гц для горизонтальных и вертикальных форм) удовлетворяются. Резонансные явления в конструкциях трибун не возникают.

6.6. Механическая безопасность железобетонных и стальных (малые покрытия) конструкций секторов 1-14 подтверждается проведенными расчетными исследованиями.

7. *Конструкции купола*

7.1. Разработана и верифицирована в ПК SCAD OFFICE пространственная конечноэлементная модель основного покрытия (купола), адекватно отражающая его геометрико-жесткостные, инерционные и нагрузочные характеристики и результирующее напряженно-деформированное состояние, параметры прочности, устойчивости и динамики.

7.2. Проведен сопоставительный анализ альтернативных расчетов [**Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**] конструкций купола, достигнуто приемлемое соответствие по основным критериальным параметрам.

7.3. Выполненными расчетными исследованиями установлено, что при соблюдении принятых параметров проекта (геометрия, сечения конструктивных элементов, свойства материалов и соединений, величины и сочетания нагрузок и воздействий) состояние несущих конструкций купола удовлетворяет нормативным критериям механической безопасности (деформативности, прочности и устойчивости). Коэффициент использования конструктивных элементов купола < 1 (подробнее в [**Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**]).

7.4. Проанализированы результаты расчетного обоснования конструктивных узлов купола [**Error! Reference source not found.**]. Проведены оценки сварных и болтовых соединений по нормативной методике. Прочность рассматриваемых конструктивных узлов обеспечена.

7.5. Механическая безопасность стальных конструкций купола подтверждается проведенными расчетными исследованиями.

8. *Витражные ограждающие (фасадные) конструкции*

8.1. Разработана и верифицирована в ПК ЛИРА-САПР пространственная конечноэлементная модель фасада, адекватно отражающая его геометрико-жесткостные, инерционные и нагрузочные характеристики и результирующее напряженно-деформированное состояние, параметры прочности, устойчивости и динамики.

8.2. Анализ результатов альтернативных расчетов витражных и ограждающих конструкций на основное сочетание нагрузок показал приемлемое соответствие результатов при непротиворечивой картине распределения перемещений и усилий (сил и моментов). Критериальные значения параметров витражных конструкций (усилия в элементах, горизонтальные перемещения, перемещения и напряжения светопрозрачного заполнения, коэффициенты использования) находятся в диапазоне нормативно-регламентированных величин [**Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**].

8.3. Механическая безопасность фасадных конструкций обоснована и подтверждается проведенными расчетными исследованиями.

9. В рамках научно-технического сопровождения **разработаны рекомендаций по количеству циклов нагружения** для расчета элементов стальных конструкций на усталость [**Error! Reference source not found.**]. На основании проведенного исследования по определению числа циклов нагружения от ветровой нагрузки получено расчетное значение Nc,100,norm = 8000 циклов. С учетом этого расчет на усталость для стальных конструкций Объекта (прежде всего, декоративного козырька) не требуется.

10. В рамках научно-технического сопровождения **разработана программа технического мониторинга** при возведении и эксплуатации сооружений Объекта: «Реконструкция Петербургского спортивно-концертного комплекса, расположенного по адресу: Российская Федерация, Санкт-Петербург, муниципальный округ Гагаринское, пр. Юрия Гагарина, д.8, кадастровый номер 78:14:0007633:3082, в целях создания многофункционального спортивно-досугового комплекса». В программе использованы данные полученные в результаты расчетного обоснования конструкций Объекта.

11. Из вышеизложенного следует, что результаты выполненного научно-технического сопровождения проекта, включая альтернативные и уточненные расчетные исследования НДС и нормативные оценки несущей способности, являются достоверным **обоснованием механической безопасности принятых конструктивных решений для Петербургского спортивно-концертного комплекса**.