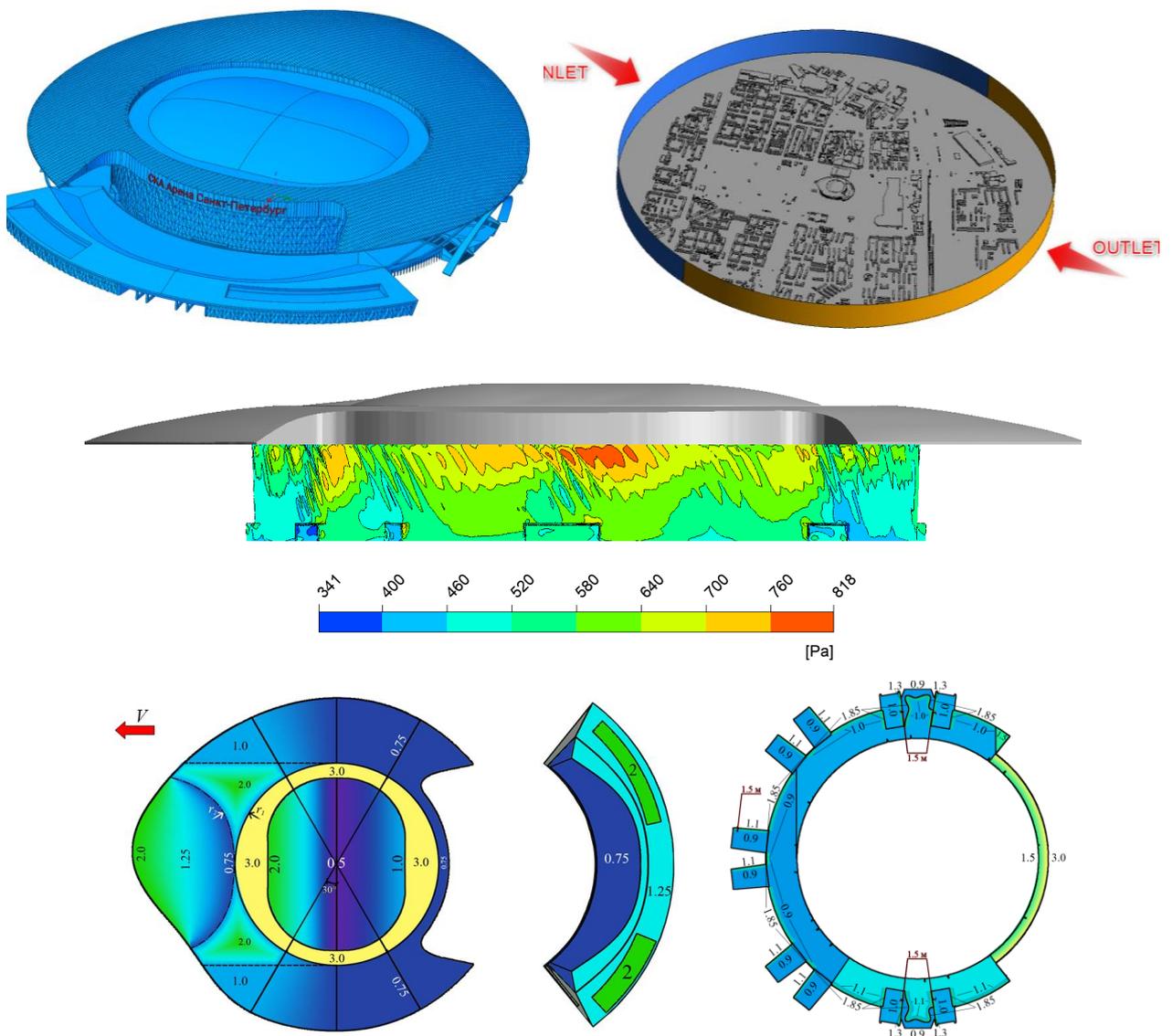


Научно-технический отчет

Научно-техническое сопровождение проектирования Объекта «Реконструкция
Петербургского спортивно-концертного комплекса, расположенного по адресу:
Российская Федерация, Санкт-Петербург, муниципальный округ Гагаринское, пр.
Юрия Гагарина, д.8»

Комплексные аэродинамические исследования по Объекту (с учетом окружающей
застройки) на основе численного решения трехмерных задач аэродинамики



1. Исходные данные. Постановка задач

Постановка задач расчетных исследований

В соответствии с техническим заданием 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 существующей окружающей застройки и различных направлений ветра;
- 3) выявление наиболее опасных и характерных направлений ветра на основе анализа суммарных ветровых нагрузок на несущие конструкции Объекта, полученных в результате численного моделирования;
- 4) определение расчетных средних и пульсационных составляющих ветровой нагрузки на непроницаемые конструкции для исследуемых направлений ветра на основе результатов математического (численного) моделирования;
- 5) определение расчетных средних и пульсационных составляющих ветровой нагрузки для проницаемых конструкций системы опирания козырька на основе синтеза на основе синтеза действующих нормативных методик и результатов математического (численного) моделирования;
- 6) определение распределения пикового (минимального и максимального) ветрового давления на ограждающие конструкции Объекта на основе результатов математического (численного) моделирования;
- 7) определение распределения снеговых нагрузок на конструкции покрытия Объекта на основе синтеза результатов математического (численного) моделирования снегопереноса и действующих нормативных методик, а также с учетом результатов физического (экспериментального) моделирования;
- 8) определение средней и пульсационной составляющей скорости ветра на уровне 1.5 м над землей и пешеходными частями Объекта, оценка ветровой комфортности предполагаемых пешеходных зон на основе критериев МДС 20-1.2006 при заданной розе ветров;
- 9) оценка возможности возникновения аэродинамической неустойчивости конструкций козырька и его систем опирания на основе синтеза действующих нормативных методик и результатов математического (численного) моделирования.

Площадка строительства, рельеф и застройка объекта

Земельный участок под строительство Петербургского спортивно-концертного комплекса (далее Объект) расположен на проспекте Юрия Гагарина в городе Санкт-Петербург. Территория строительства ограничена с севера торговым комплексом; с запада – через проспект Юрия Гагарина Московским парком Победы, с востока – через проспект Космонавтов торговым центром «Питер Радуга», с юга – музеем «Исторический парк Россия - Моя история».

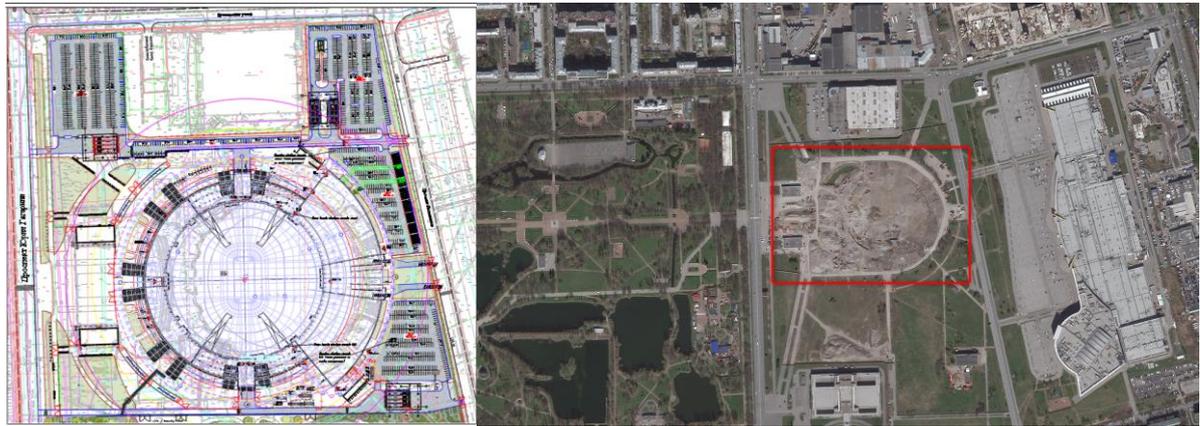


Рис. Схема планировочной организации земельного участка и карта местности возле площадки строительства

Рассматриваемая территория характеризуется умеренным избыточно-влажным климатом с неустойчивым режимом погоды и, в соответствии со СП 131.13330, относится ко II В подрайону по климатическому районированию России и II типу местности по характеру и степени увлажнения.

На климатические условия рассматриваемой территории оказывают влияние внутренние водоемы (Финский залив и Ладожское озеро). В целом, климат характеризуется как близкий к морскому, умеренно холодный, влажный, с умеренно теплым влажным летом и довольно продолжительной умеренно холодной зимой. Ветры южных, юго-западных и западных направлений приносят теплый и влажный атлантический воздух. Смена различных воздушных масс является причиной неустойчивой, изменчивой погоды.

Климат характеризуется четырехсезонной структурой. Среднегодовая температура воздуха составляет 5,4 градуса. Самыми холодными месяцами являются январь и февраль, их среднемесячная температура составляет минус 8,0-7,9 градусов. Самым теплым месяцем является июль со средней температурой воздуха 17,1 градуса. Абсолютный максимум температуры составляет 37 градусов.

Большое влияние на климат оказывают ветры, которые приносят в город воздух часто из областей с другими климатическими условиями. Преобладающими являются западные и юго-западные ветры (рис. 2.3), которые приносят в город теплый и влажный атлантический воздух, чем и объясняется морской климат Санкт-Петербурга.

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.

2.2 Краткая характеристика исследуемого Объекта

Один из крупнейших спортивных объектов своего времени такого типа СКК «Петербургский» был построен в 1970-х (ранее назывался СКК им. Ленина) и функционировал до 2019 г. В рамках реконструкции, начавшейся в 2019 г., наземная часть объекта была полностью демонтирована, а на её месте возводится уже современный комплекс.

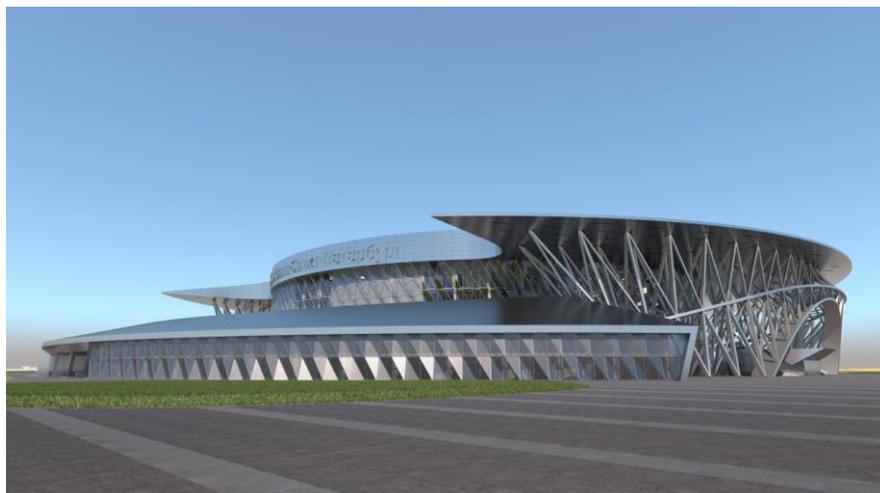


Рис. Рендеры Объекта

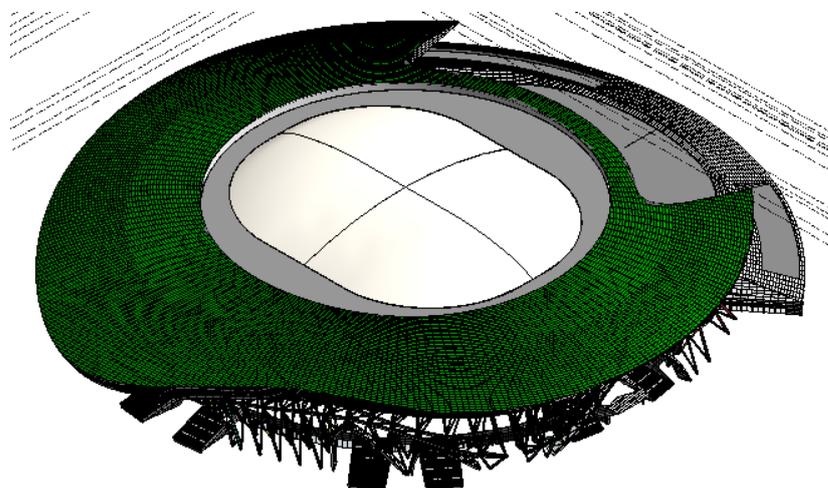


Рис. Исходная модель Объекта в формате *.rvt

2. Разработка и верификация расчётных моделей

Для моделирования ветровых нагрузок и снеговых нагрузок, а также оценки параметров ветровой комфортности пешеходных зон были созданы три расчетные модели:

- модель 1 для определения снеговых нагрузок без учета окружающей застройки;
- модель 2 для определения ветровых нагрузок без учета окружающей застройки;
- модель 3 для определения ветровых нагрузок с учетом окружающей застройки.

Геометрическая модель

Практическая подготовка расчетных моделей начинается с создания геометрических объемных моделей Объекта. Локальный рельеф местности не учитывался, т.к. перепады его высот незначительны по сравнению с габаритами Объекта. Геометрия Объекта выполнена согласно исходным данным. Окружающая застройка учитывалась упрощенно на основе спутниковых данных, свободно предоставляемым источником *earth.google.com*. Для модели 1 для определения снеговых нагрузок конструкции опирания козырька не учитывались. Объемные геометрические модели создавались в модуле ANSYS SpaceClaim.

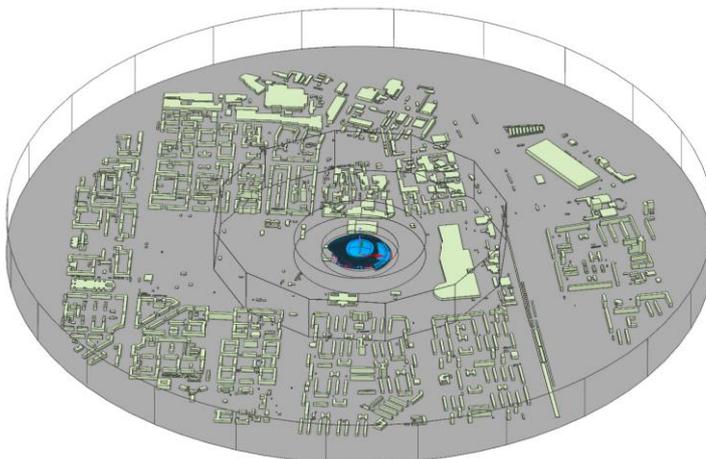


Рис. Модель 3 – с застройкой. Геометрическая модель. Общий вид. Фиолетовым выделен исследуемый объект, серым – неисследуемая застройка.

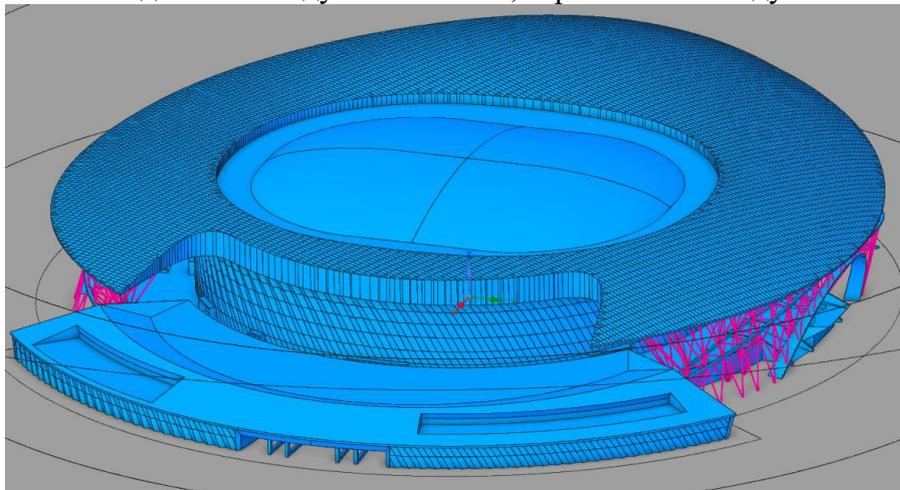


Рис. Модель 2 – с застройкой. Геометрическая модель. Виды вблизи СКК.

Конечнообъемные сетки

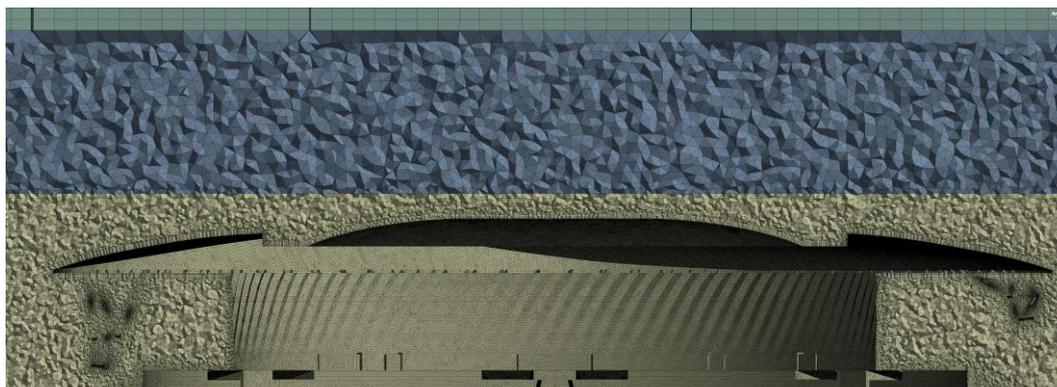


Рис. Модель 2 – без застройки. Разрез конечнообъемной сетки

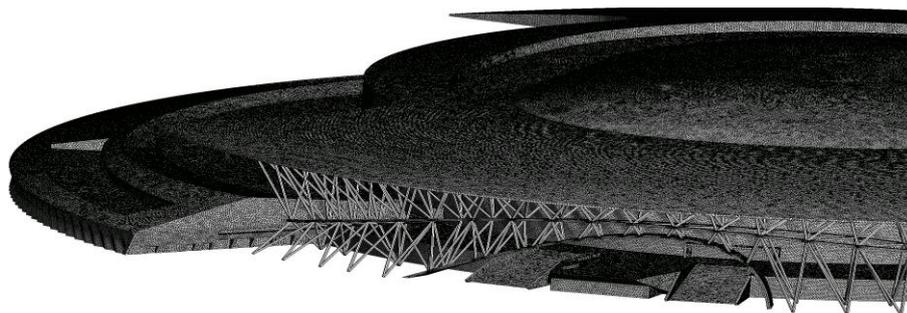


Рис. Модель 2 – без застройки. Поверхностная сетка КО-модели СКК

Граничные условия

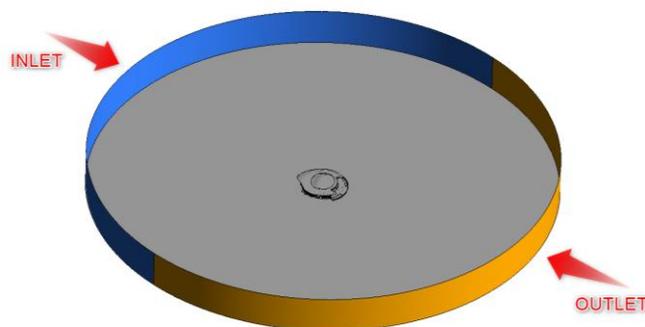


Рис. Расчетная область Модели 2 (ANSYS CFX) с обозначенными граничными условиями. Угол атаки 300°

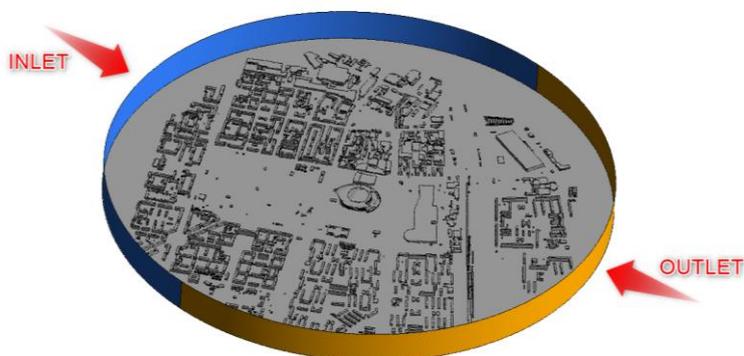


Рис. Расчетная область Модели 3 (ANSYS CFX) с обозначенными граничными условиями. Угол атаки 300°

3. Определение расчетных ветровых нагрузок

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.

Схемы нумерации поверхностей сбора аэродинамических нагрузок (далее зоны) приведены на рис. Зоны представляют собой поверхности, 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 отчета о НИР.

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.

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:

Ветровые нагрузки на несущие конструкции:

– средние суммарные ветровые нагрузки на несущие конструкции СКК 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 и в форме графиков;

– средняя составляющая ветрового давления (P , Па), суммарное ветровое давление ($P_{sum} = P + k_{puls} \cdot P$, Па) и их отношение (P/P_{sum}) на *Декоративный козырек СКК* для 8-ми направлений (шаг по углу 45°) без учета окружающей застройки в табличном виде;

– изополя средней (P , Па) и пульсационной (P_{puls} , Па), составляющих ветрового давления, суммарного ветрового давления (P_{sum} , Па) и рекомендуемые для применения в прочностных расчетах схемы ветровых нагрузок на несущие конструкции *Декоративного козырька, Купола и покрытия Гостиницы*;

– средняя (P , Па) и пульсационная (P_{puls} , Па), составляющие ветрового давления, суммарное ветровое давление (P_{sum} , Па) для *Светопрозрачного фасада и торцевых частей Декоративного козырька* в форме эпюр. Значения на эпюрах являются средними по высоте;

– средняя (P , Па) и пульсационная (P_{puls} , Па), составляющие ветрового давления, суммарное ветровое давление ($P_{sum} = P + k_{puls} \cdot P$, Па) для зоны сбора аэродинамической нагрузки *нижней части Декоративного козырька* в табличном виде.

Ветровые нагрузки на ограждающие (фасадные) конструкции:

– изополя верхней огибающей максимальных значений ветрового давления, нижней огибающей минимальных значений ветрового давления представлены в графическом виде на рис.

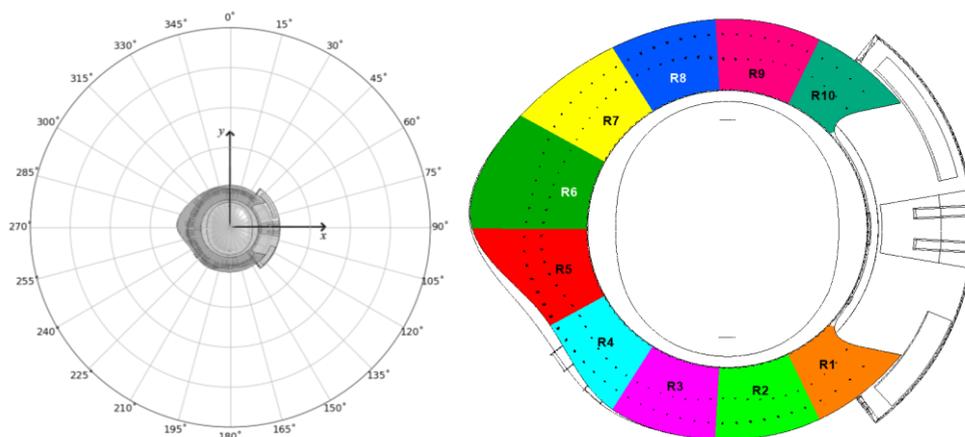


Рис. Система координат и расчетные направления ветрового потока и вид схемы зон нижней части Декоративного козырька СКК для сбора аэродинамических нагрузок.

Ветровые нагрузки на несущие конструкции

В пункте отдельно рассмотрены нагрузки на несущие конструкции непроницаемых частей сооружений и проницаемых – систему опирания *Декоративного козырька*.

Ветровые нагрузки на несущие конструкции непроницаемых частей Объекта

Были представлены:

– средние суммарные ветровые нагрузки на несущие конструкции СКК 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 и в форме графиков;

– средняя составляющая ветрового давления (P , Па), суммарное ветровое давление ($P_{sum} = P + k_{puls} \cdot P$, Па) и их отношение (P/P_{sum}) на Декоративный козырек СКК для 8-ми направлений (шаг по углу 45°) без учета окружающей застройки в табличном виде;

– изополя средней (P , Па) и пульсационной (P_{puls} , Па), составляющих ветрового давления, суммарного ветрового давления (P_{sum} , Па) и рекомендуемые для применения в прочностных расчетах схемы ветровых нагрузок на несущие конструкции Декоративного козырька, Купола и покрытия Гостиницы;

– средняя (P , Па) и пульсационная (P_{puls} , Па), составляющие ветрового давления, суммарное ветровое давление (P_{sum} , Па) для Светопрозрачного фасада и торцевых частей Декоративного покрытия в форме эпюр, рекомендуемых для применения в прочностных расчетах. Значения на эпюрах являются средними по высоте;

– средняя (P , Па) и пульсационная (P_{puls} , Па), составляющие ветрового давления, суммарное ветровое давление (P_{sum} , Па) для зоны сбора аэродинамической нагрузки нижней части Декоративного козырька в табличном виде, рекомендуемые для применения в прочностных расчетах случаи выделены цветом.

Таблица Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y), векторная сумма нагрузки (F_R) и суммарная вертикальная сила (F_z) на СКК в зависимости от направления ветра.

Угол, °	СКК							
	Без учета застройки				С учетом застройки			
	F_x , тс	F_y , тс	F_R , тс	F_z , тс	F_x , тс	F_y , тс	F_R , тс	F_z , тс
0°	103	-200	225	1 256	22	-137	139	380
15°	-48	-207	213	1 112	3	-144	144	435
30°	-101	-192	217	1 040	-50	-117	127	397
45°	-161	-182	243	1 041	-108	-128	167	431
60°	-217	-165	273	1 030	-172	-114	207	520
75°	-295	-69	303	960	-151	-48	158	360
90°	-257	3	257	924	-242	-24	243	519
105°	-263	94	279	993	-230	82	244	595
120°	-220	180	284	1 079	-167	133	213	587
135°	-177	191	260	1 068	-67	111	130	383
150°	-73	205	218	1 104	-32	124	128	452
165°	-47	196	202	1 143	3	118	118	408
180°	116	209	239	1 345	16	126	127	446
195°	126	215	249	1 394	73	108	130	481
210°	134	243	277	1 389	87	127	154	510
225°	184	205	275	1 341	138	125	186	642
240°	194	162	252	1 296	165	123	206	838
255°	224	125	257	1 253	206	107	232	916
270°	251	13	251	1 259	197	43	202	784
285°	228	-66	238	1 231	173	-31	175	686
300°	187	-130	228	1 252	128	-70	145	449
315°	169	-181	248	1 282	58	-52	78	156
330°	175	-163	240	1 301	64	-98	117	196
345°	81	-198	214	1 269	49	-156	164	353

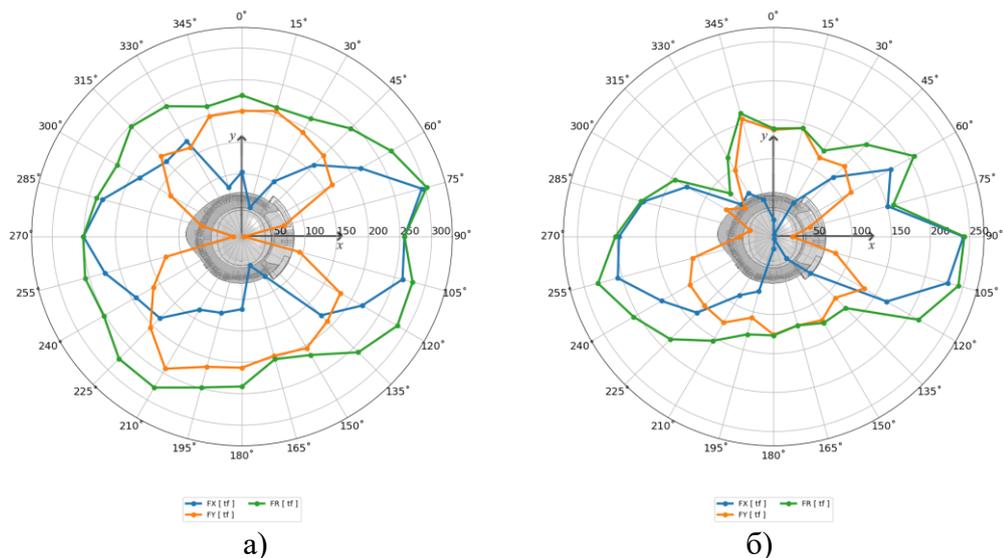


Рис. Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y) и векторная сумма нагрузки (F_R) в зависимости от направления ветра на несущие конструкции СКК, тс (значения приведены по модулю: а) без учета окружающей застройки, б) с учетом окружающей застройки

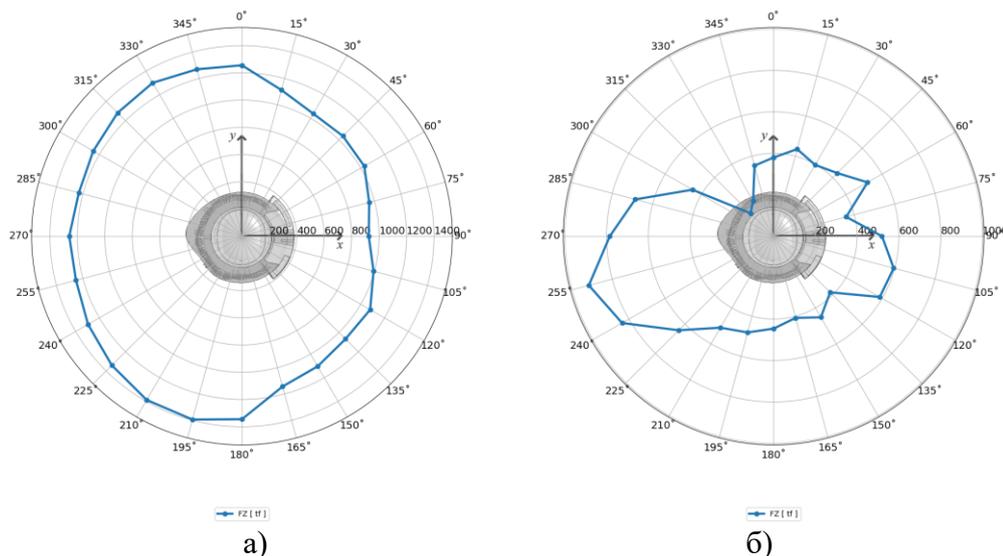


Рис. Суммарная вертикальная сила (F_z) в зависимости от направления ветра на несущие конструкции СКК, тс: а) без учета окружающей застройки, б) с учетом окружающей застройки

Таблица Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y), векторная сумма нагрузки (F_R) и суммарная вертикальная сила (F_z) на *Покрытие СКК* (Декоративный козырек и Купол) в зависимости от направления ветра.

Угол, °	Покрытие							
	Без учета застройки				С учетом застройки			
	F_x , тс	F_y , тс	F_R , тс	F_z , тс	F_x , тс	F_y , тс	F_R , тс	F_z , тс
0°	27	-13	30	1 103	2	-28	28	383
15°	0	-17	17	989	1	-49	49	477
30°	-10	-25	27	943	-7	-35	36	427
45°	-34	-23	41	886	-32	-35	47	514
60°	-50	-19	54	770	-44	-31	54	476
75°	-64	-6	65	722	-35	1	35	419
90°	-59	12	60	775	-60	1	60	500

105°	-61	25	66	779	-59	18	62	597
120°	-60	40	72	882	-42	32	53	656
135°	-42	34	54	917	-19	27	33	434
150°	-17	35	39	999	-7	24	25	549
165°	-9	21	22	1 035	2	51	51	445
180°	35	25	43	1 213	1	44	44	502
195°	45	13	47	1 233	25	32	40	513
210°	46	19	50	1 236	26	19	33	509
225°	53	19	56	1 155	41	39	57	609
240°	50	32	59	1 129	46	39	60	782
255°	56	37	67	1 063	55	42	69	844
270°	52	22	57	1 056	48	18	51	724
285°	41	10	42	1 043	39	-1	39	653
300°	30	3	30	1 064	36	-19	41	452
315°	24	4	24	1 075	19	-19	27	199
330°	34	11	36	1 088	22	-26	34	249
345°	15	3	15	1 107	29	-43	51	399

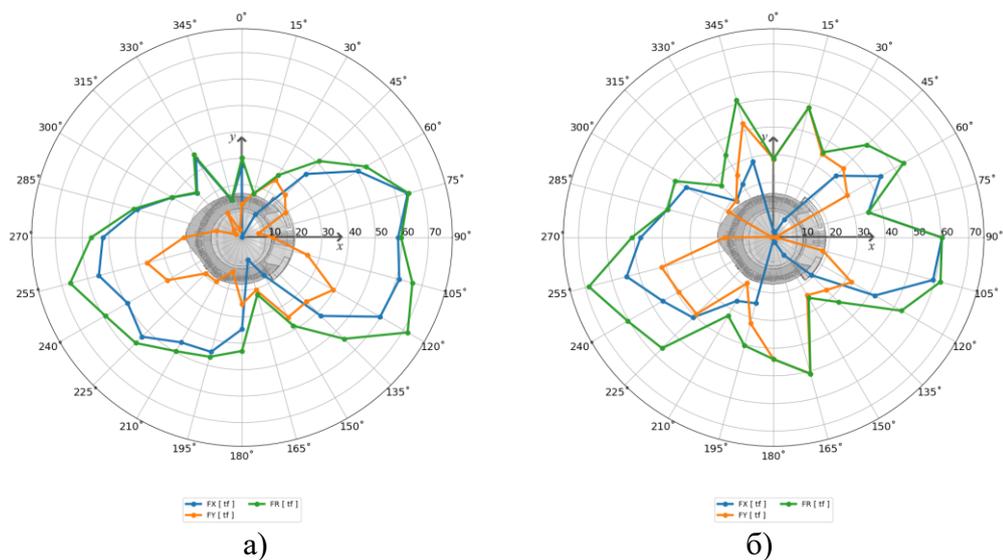


Рис. Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y) и векторная сумма нагрузки (F_R) в зависимости от направления ветра на несущие конструкции *Покрытия СКК (Декоративный козырек и Купол)*, тс (значения приведены по модулю): а) без учета окружающей застройки, б) с учетом окружающей застройки

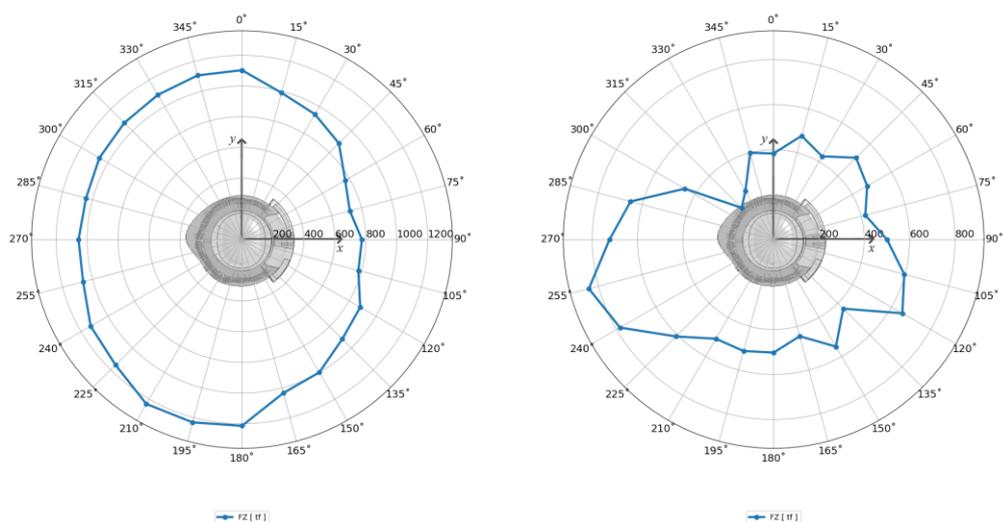


Рис. Суммарная вертикальная сила (F_z) в зависимости от направления ветра на несущие конструкции *Покрытия СКК (Декоративный козырек и Купол)*, тс: а) без учета окружающей застройки, б) с учетом окружающей застройки

Таблица. Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y), векторная сумма нагрузки (F_R) и суммарная вертикальная сила (F_z) на *Светопрозрачный фасад СКК* в зависимости от направления ветра.

Угол, °	Светопрозрачный фасад					
	Без учета застройки			С учетом застройки		
	F_x , тс	F_y , тс	F_R , тс	F_x , тс	F_y , тс	F_R , тс
0°	67	-108	127	6	-64	65
15°	-43	-107	115	0	-56	56
30°	-68	-89	112	-26	-38	46
45°	-96	-93	134	-54	-55	77
60°	-116	-94	149	-96	-55	111
75°	-149	-43	155	-76	-29	81
90°	-128	-15	129	-128	-24	130
105°	-135	50	144	-119	45	127
120°	-107	96	143	-81	66	104
135°	-105	92	139	-21	50	54
150°	-30	93	98	-17	57	60
165°	-33	92	98	3	40	40
180°	67	103	123	8	53	54
195°	53	130	140	34	47	58
210°	49	162	169	34	81	88
225°	75	135	155	60	63	86
240°	88	92	127	75	60	96
255°	116	68	134	100	50	112
270°	139	-10	139	100	20	102
285°	124	-58	137	86	-23	89
300°	98	-97	138	58	-37	69
315°	88	-139	164	25	-23	34
330°	101	-115	154	26	-49	55
345°	38	-129	134	8	-66	67

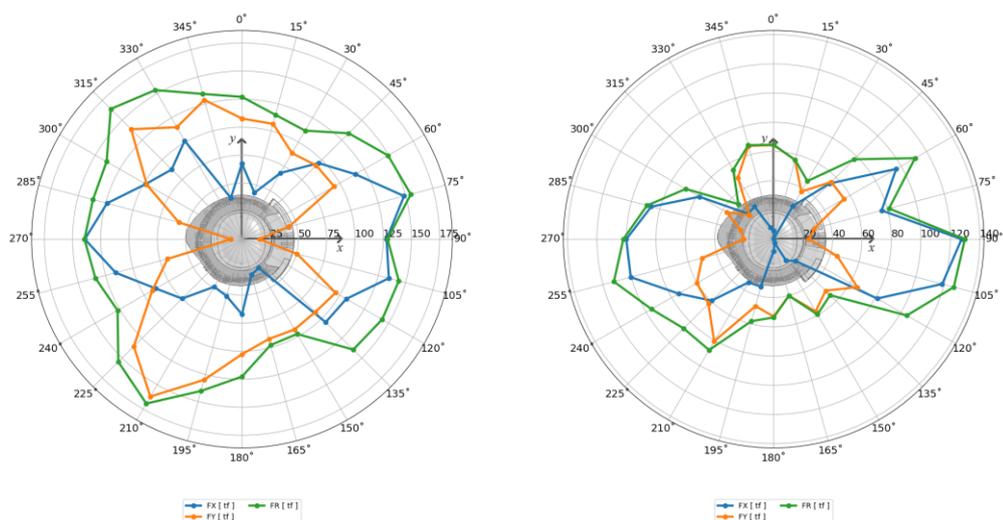


Рис. Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y) и векторная сумма нагрузки (F_R) в зависимости от направления ветра на несущие конструкции *Светопрозрачного фасада СКК*, тс (значения приведены по модулю: а) без учета окружающей застройки, б) с учетом окружающей застройки

Таблица. Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y), векторная сумма нагрузки (F_R) и суммарная вертикальная сила (F_z) на *Гостиницу СКК* в зависимости от направления ветра.

Угол, °	Гостиница							
	Без учета застройки				С учетом застройки			
	FX, тс	FY, тс	FR, тс	FZ, тс	FX, тс	FY, тс	FR, тс	FZ, тс
0°	20.8	-28.9	35.6	186	15.1	-18.8	24.1	29
15°	16.8	-39.5	42.9	99	5.9	-19.8	20.7	-3
30°	4.8	-40.9	41.1	55	-3.8	-21.4	21.8	-2
45°	-2.5	-41.8	41.9	91	-8.2	-20.9	22.5	-81
60°	-22.3	-35.3	41.8	170	-20.9	-16.9	26.9	34
75°	-59.0	-11.4	60.0	122	-23.8	-12.9	27.1	-71
90°	-53.1	4.6	53.3	43	-39.6	0.5	39.6	-35
105°	-49.6	12.5	51.1	109	-37.0	16.6	40.6	-47
120°	-26.2	27.2	37.8	118	-27.1	23.8	36.1	-64
135°	-2.7	38.9	39.0	96	-14.0	20.5	24.9	-26
150°	2.1	42.5	42.5	72	-1.8	20.8	20.9	-40
165°	17.3	38.6	42.3	91	6.2	14.4	15.7	18
180°	24.1	29.3	38.0	180	2.0	9.5	9.7	4
195°	27.7	14.2	31.1	202	8.0	5.8	9.9	47
210°	24.9	3.8	25.2	179	14.1	0.2	14.2	63
225°	25.5	-0.4	25.5	201	8.5	-1.6	8.6	72
240°	16.7	0.4	16.7	158	7.4	-1.4	7.6	92
255°	8.5	-1.6	8.7	158	4.9	-1.3	5.1	88
270°	9.3	0.7	9.4	175	5.0	-0.6	5.0	83
285°	14.5	-0.5	14.5	168	7.4	-0.4	7.4	69
300°	17.8	0.2	17.8	183	1.3	-0.4	1.3	38
315°	28.3	3.9	28.5	221	-0.6	-0.4	0.8	3
330°	21.9	-5.0	22.5	235	9.2	-5.0	10.5	29
345°	28.5	-16.8	33.1	194	14.4	-15.9	21.4	42

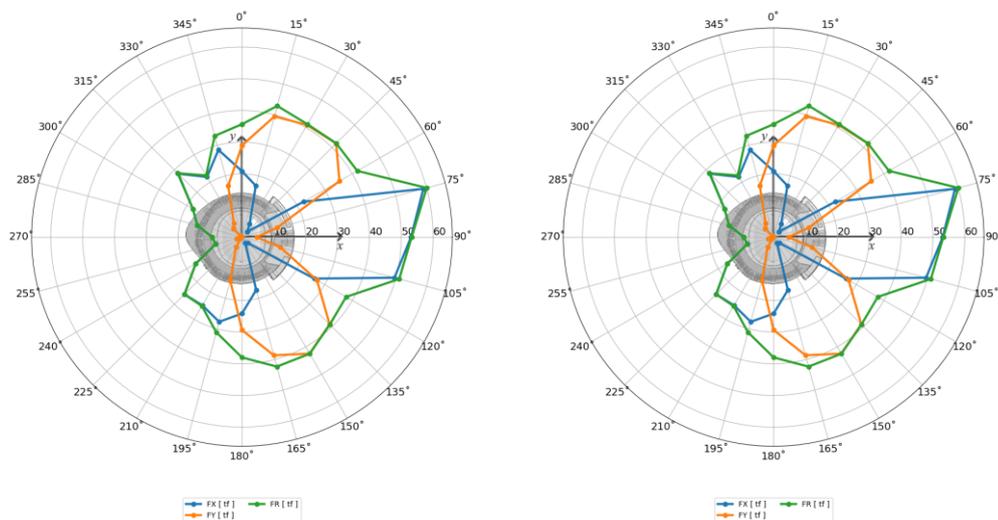


Рис. Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y) и векторная сумма нагрузки (F_R) в зависимости от направления ветра на несущие конструкции Гостиницы СКК, тс (значения приведены по модулю) : а) без учета окружающей застройки, б) с учетом окружающей застройки

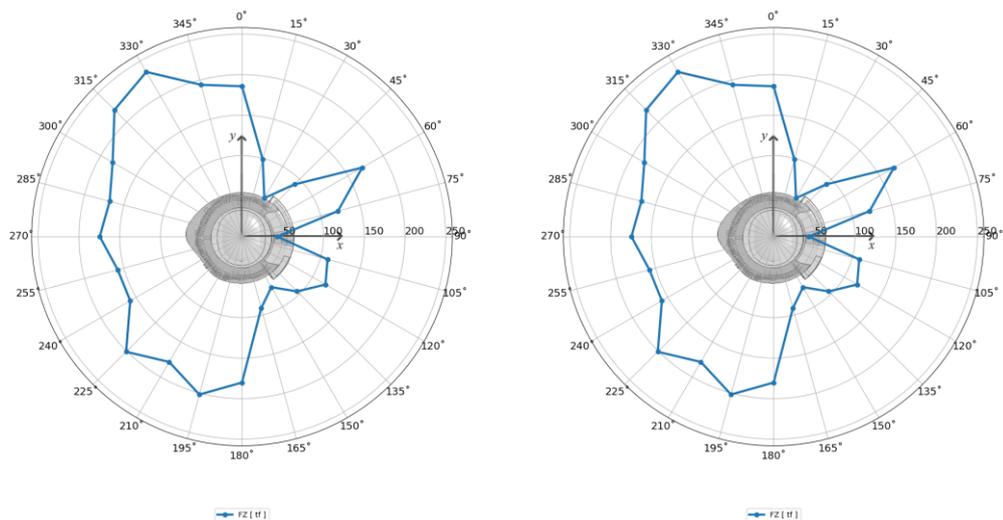


Рис. Суммарная вертикальная сила (F_z) в зависимости от направления ветра на несущие конструкции *Гостиницы СКК*, тс а) без учета окружающей застройки, б) с учетом окружающей застройки

Таблица Средняя составляющая ветрового давления (P , Па), суммарное ветровое давление (P_{sum} , Па) и их отношение (P/P_{sum}) на *Декоративный козырек СКК* в зависимости от направления ветра.

Угол, °	Декоративный козырек СКК		
	Без учета застройки		
	P , Па	P_{sum} , Па	P/P_{sum}
0°	105.83	241.23	0.439
45°	121.97	257.79	0.473
90°	145.14	290.60	0.499
135°	124.87	258.72	0.483
180°	116.48	259.69	0.449
225°	116.87	245.98	0.475
270°	97.58	223.01	0.438
315°	97.07	218.29	0.445

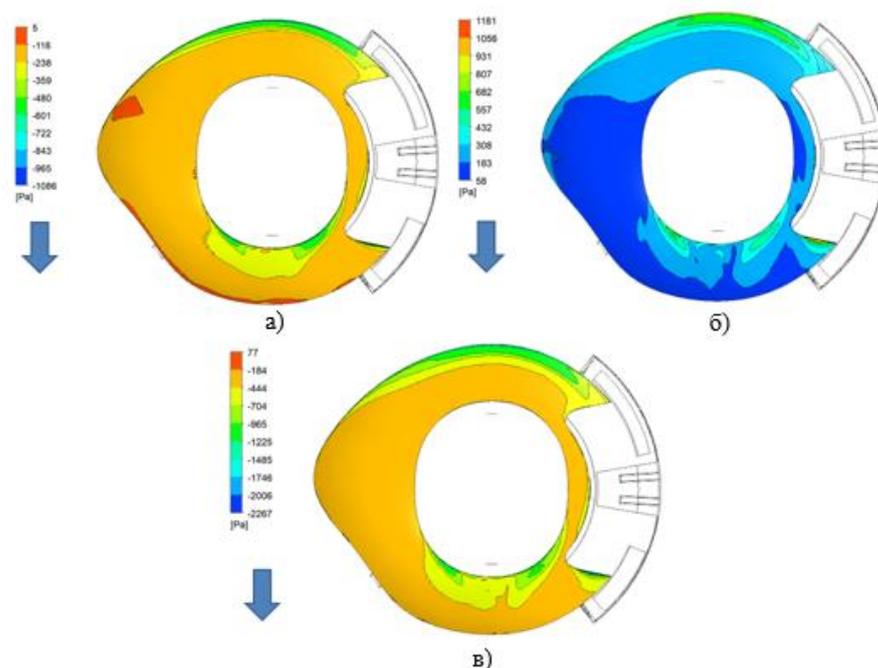


Рис. Составляющие ветрового давления (Па) (а) средняя, б) пульсационная, в) суммарная) на конструкции *Декоративного козырька СКК* без учета окружающей застройки. Угол атаки ветра 0°

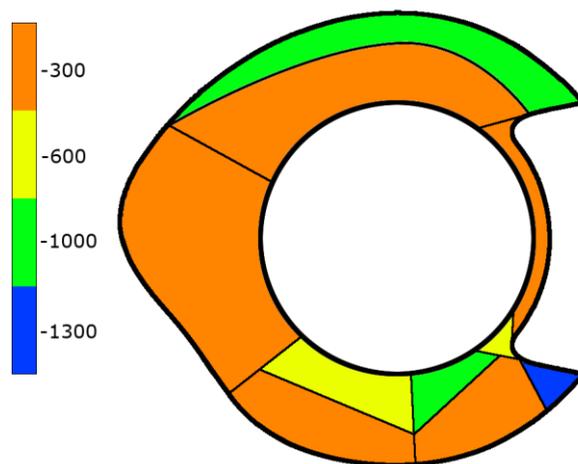


Рис. Схема назначения суммарных ветровых давлений (Па) на несущие конструкции Декоративного козырька СКК без учета окружающей застройки. Угол атаки ветра 0° .

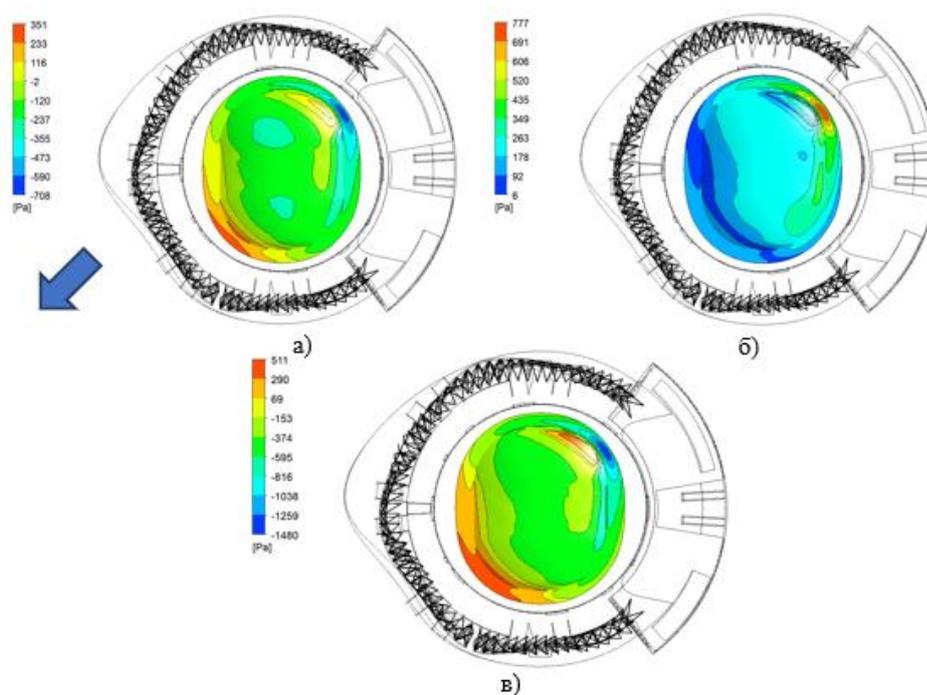


Рис. Составляющие ветрового давления (Па) (а) средняя, б) пульсационная, в) суммарная) на несущие конструкции Купола СКК без учета окружающей застройки. Угол атаки ветра 45°

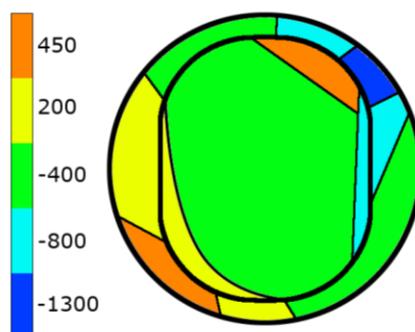


Рис. Схема назначения суммарных ветровых давлений (Па) на несущие конструкции Декоративного козырька. Угол атаки ветра 45° .

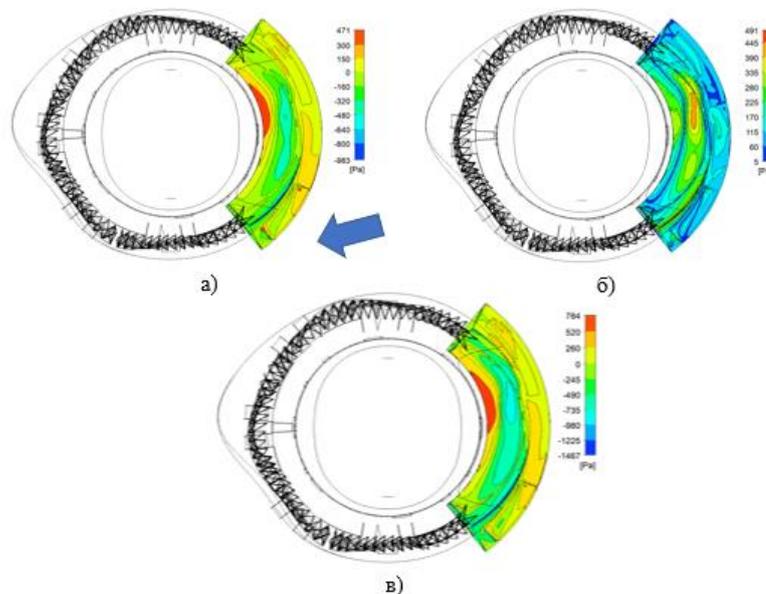


Рис. Составляющие ветрового давления (Па) (а) средняя, б) пульсационная, в) суммарная) на несущие конструкции *Покрытия Отеля СКК* без учета окружающей застройки. Угол атаки ветра 75°

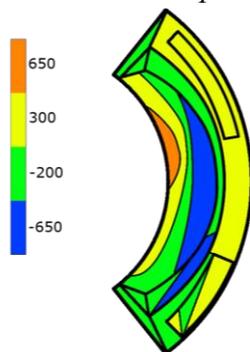


Рис. 3.1 Схема назначения суммарных ветровых давлений (Па) на несущие конструкции *покрытия Гостиницы*. Угол атаки ветра 75° .

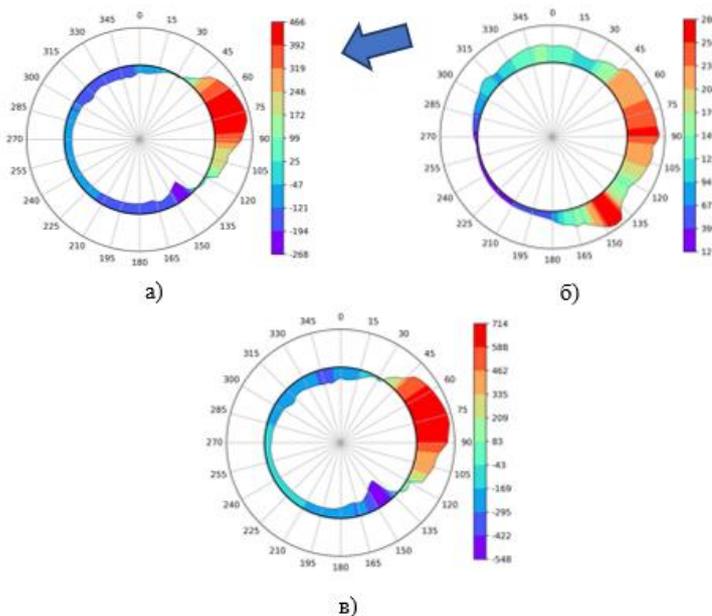


Рис. Эпюры составляющих ветрового давления (Па) (а) средняя, б) пульсационная, в) суммарная) на несущие конструкции *Покрытия Отеля СКК* без учета окружающей застройки. Угол атаки ветра 75°

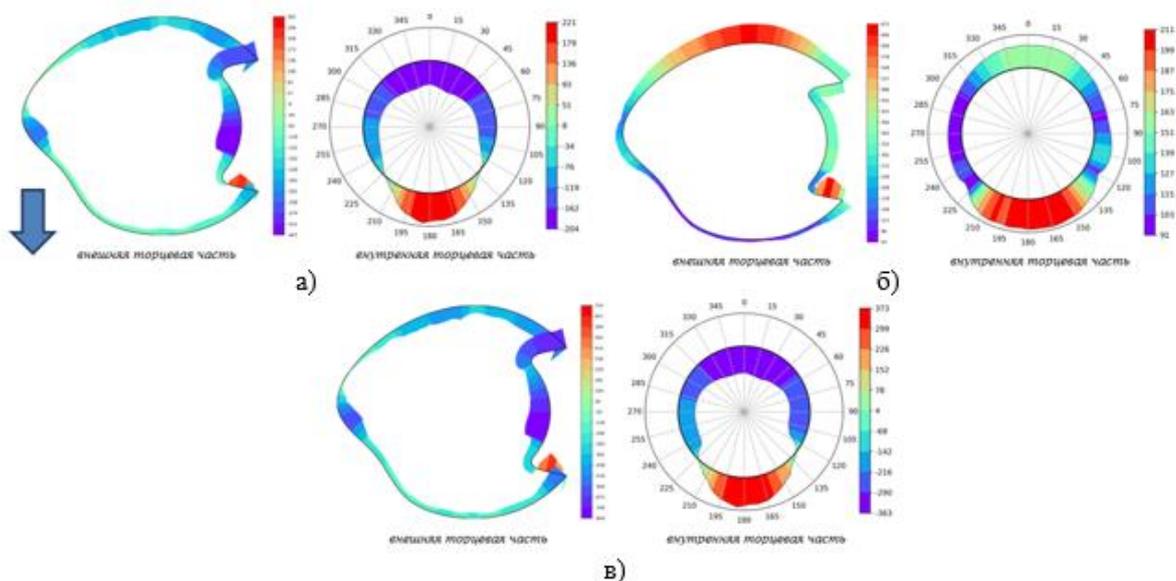


Рис. Эпюры составляющих ветрового давления (Па) (а) средняя, б) пульсационная, в) суммарная) на конструкции торцевых частей Декоративного козырька СКК без учета окружающей застройки.
Угол атаки ветра 0°

Таблица Суммарное ветровое давление (P_{sum} , Па) для зон нижней части Декоративного козырька без учета окружающей застройки.

Угол атаки ветра, °	R1	R2	R3	R4	R5
0°	-308	-118	-135	-155	-203
15°	-197	-153	-195	-231	-228
30°	-352	-148	-187	-204	-209
45°	-475	-235	-153	-144	-170
60°	-607	-319	-183	-116	-112
75°	-371	-228	-172	-157	-143
90°	-214	-260	-194	-168	-128
105°	185	-163	-207	-160	-153
120°	467	222	-191	-177	-155
135°	517	427	-142	-238	-191
150°	515	578	213	-242	-183
165°	377	635	409	-177	-259
180°	209	603	577	224	-193
195°	-265	488	633	431	-155
210°	-238	324	588	556	169
225°	-267	125	442	594	367
240°	-253	-172	212	526	512
255°	-226	-229	-139	377	578
270°	-278	-249	-242	177	541
285°	-272	-288	-287	-177	396
300°	-242	-266	-295	-309	189
315°	-211	-240	-287	-285	-157
330°	-155	-138	-206	-259	-244
345°	-185	-162	-181	-249	-274

..

Ветровые нагрузки на несущие конструкции проницаемых частей Объекта

В пункте представлены рекомендации по назначению ветровых нагрузок на конструктивные элементы системы опирания *Декоративного козырька*.

На рис. представлены средние скорости ветра на характерной для системы опирания высоте (20м над ур. земли) для опасных расчетных случаев 0° , 195° , 270° (без застройки) и 315° (с застройкой). Эти же расчетные случаи рассматриваются для *Декоративного козырька*.

На рис. представлены изополя ветрового напора w_{0p} , схемы его зонирования и рекомендуемые в прочностных расчетах значения.

Пульсационную составляющую ветровой нагрузки w_g следует определять по действующей нормативной методике СП 20.13330.2016.

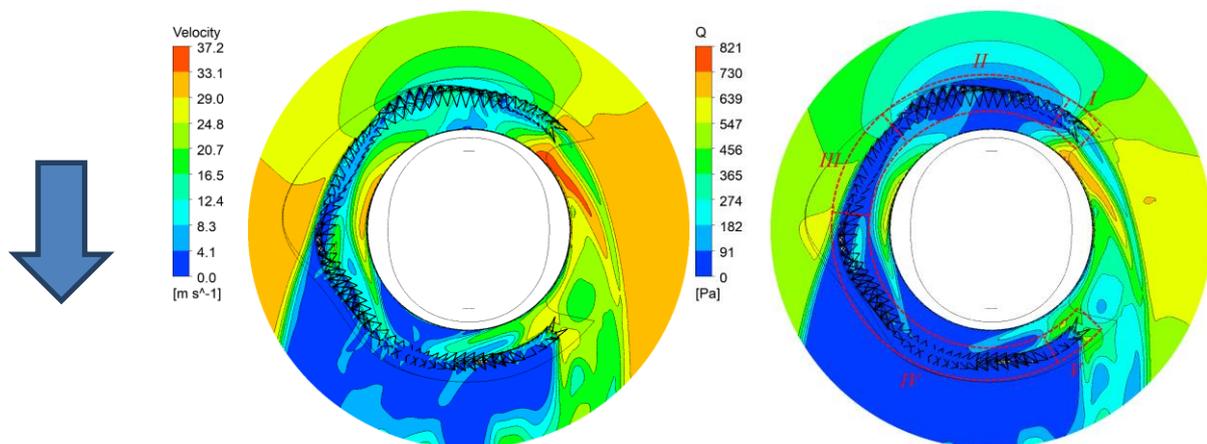


Рис. Средние скорости ветра (м/с) вокруг СКК на высоте 20м над уровнем земли и Средние значения ветрового напора (Па) и схема зонирования w_{0p} : I – 500 Па; II – 300 Па; III – 500 Па; IV – 150 Па; V – 500 Па
Угол атаки ветра 0° – без учета окружающей застройки.

Пиковые ветровые нагрузки на ограждающие конструкции

На рис. для расчётных случаев без учёта окружающей застройки и с учётом окружающей застройки в графическом виде представлены:

- изополя верхней огибающей максимальных значений ветрового давления;
- изополя нижней огибающей минимальных значений ветрового давления.

Изополя верхней огибающей ветрового давления следует использовать в расчетах фасадных конструкций СКК в качестве пиковых положительных w_+ ветровых воздействий.

Изополя нижней огибающей ветрового давления следует использовать в расчетах фасадных конструкций СКК в качестве пиковых отрицательных w_- ветровых воздействий.

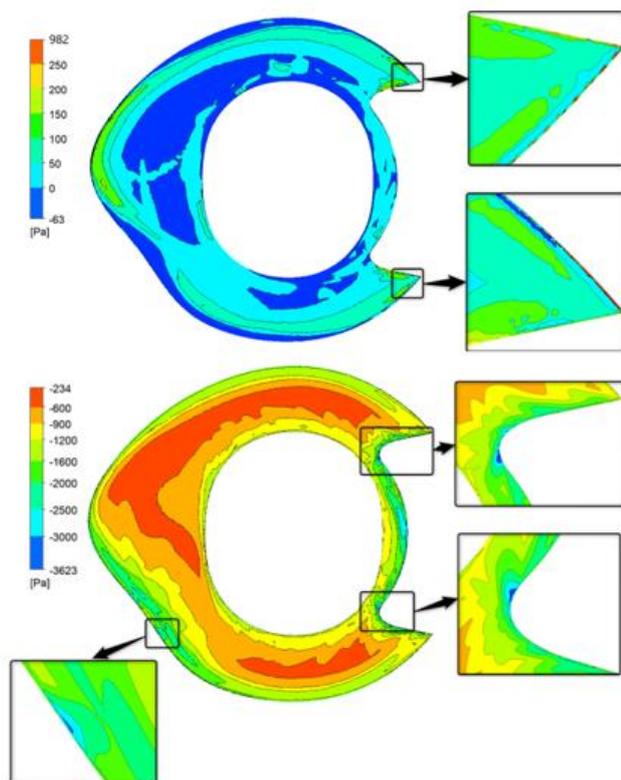


Рис. Верхняя и нижняя огибающие максимальных значений ветрового давления (Па) на ограждающие (фасадные) конструкции Декоративного козырька. Вид сверху

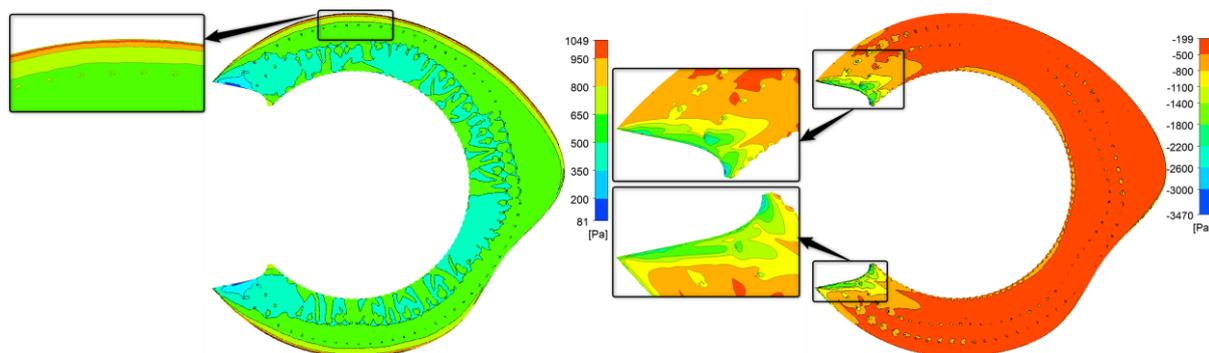


Рис. Верхняя и нижняя огибающие максимальных значений ветрового давления (Па) на ограждающие (фасадные) конструкции Декоративного козырька. Вид снизу

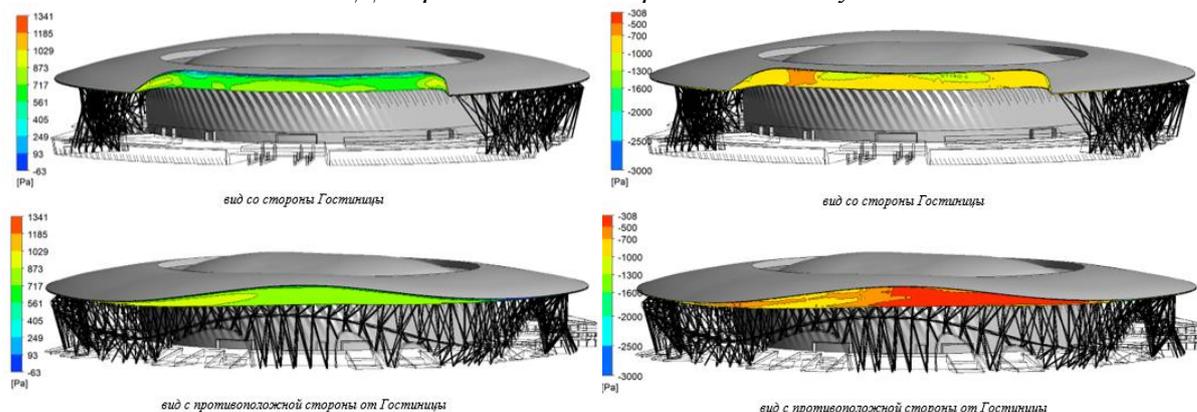


Рис. Верхняя и нижняя огибающие максимальных значений ветрового давления (Па) на ограждающие (фасадные) конструкции Декоративного козырька (внешняя торцевая часть).

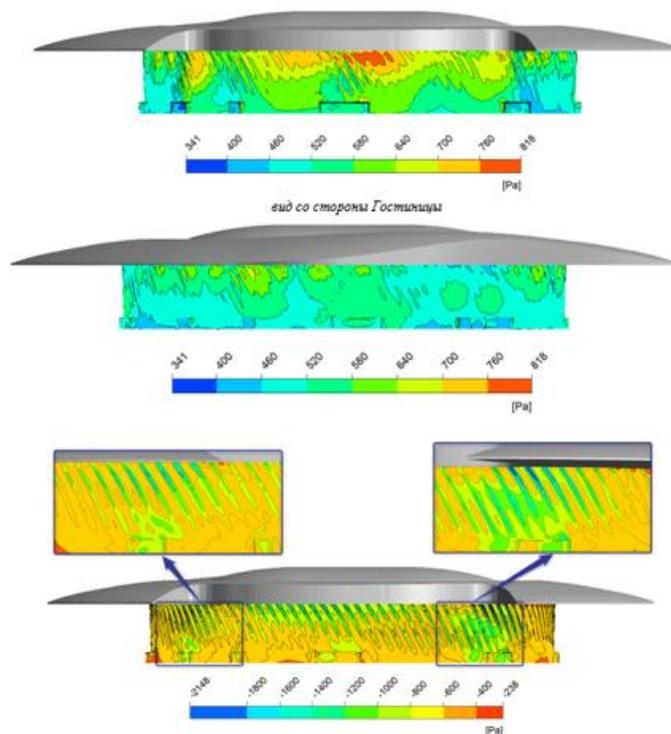


Рис. Верхняя и нижняя огибающие максимальных значений ветрового давления (Па) на ограждающие (фасадные) конструкции Светопрозрачного фасада СКК.

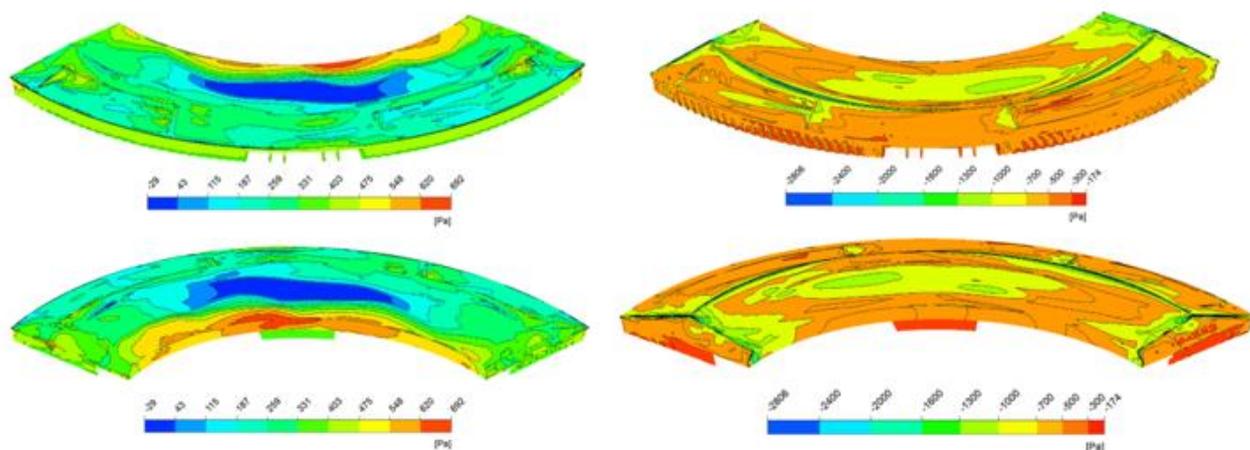


Рис. Верхняя и нижняя огибающие максимальных значений ветрового давления (Па) на ограждающие конструкции Гостиницы СКК.

Сравнение результатов физического и численного моделирования

В рамках комплексного научно-технического сопровождения проектирования Петербургского спортивно-концертного комплекса (далее СКК) было выполнено сравнение результатов физического моделирования в аэродинамической трубе средних ветровых давлений, предоставленных ООО «УНИКОН» с результатами математического (численного) моделирования ветровых нагрузок для зон светопрозрачного фасада и направлений ветра 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° , 180° , 210° , 240° , 270° и 300° , показанных на рис.

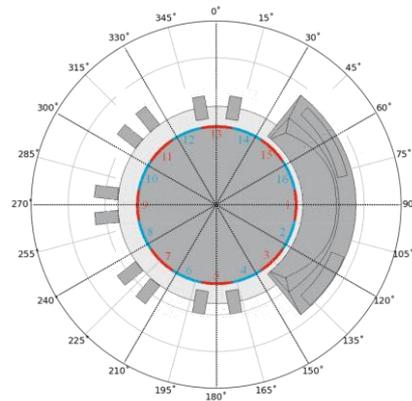


Рис. Схема направлений ветра и зон выдачи средних ветровых давлений на светопрозрачный фасад

В таблицах приведено сравнение средних ветровых давлений, полученных в аэродинамической трубе (ООО УНИКОН) и численным моделированием (ЗАО НИЦ СтаДиО) с учетом и без учета застройки.

В таблице приведены сводное сравнение средних ветровых давлений и аэродинамических коэффициентов.

Номенклатура таблицы:

Красным цветом выделены положительные ветровые давления (напор)

Синим цветом выделены отрицательные ветровые давления (отсос)

Жирным курсивом выделены значения, соответствующие основной зоне напора (куда «ударяется» поток воздуха).

Таблица Сравнение максимальных и минимальных ветровых давлений и соответствующих аэродинамических коэффициентов

	<i>MIN(P)</i>	<i>MIN(c_e)</i>	<i>MAX(P)</i>	<i>MAX(c_e)</i>
СтаДиО (мат. мод.) – с учетом застройки	-242	-0.55	428	0.97
СтаДиО (мат. мод.) – без учета застройки	-449	-1.02	420	0.95
УНИКОН (физ. мод.)	-552	-1.25	171	0.39

Сравнение результатов математического и физического моделирования ветровых нагрузок на светопрозрачный фасад выявило существенные отличия в результатах, полученных обоими методами, а также между вариантами «без учета застройки» и «с учетом застройки»

Влияние окружающей застройки в целом можно оценить как позитивное – в большинстве зон наблюдается значимое уменьшение средних ветровых давлений, особенно отрицательных.

При испытаниях в аэродинамической трубе учитывались только близлежащие низкие здания, оказывающие слабое влияние на аэродинамику Объекта, поэтому результаты физического моделирования корректней сравнивать с математическим моделированием «без учета застройки».

Существенное отличие в результатах физического и математического моделирования можно объяснить двумя факторами:

1. Малое количество датчиков давления при испытаниях в аэродинамической трубе. Рифленая форма светопрозрачного фасада приводит к сложному характеру распределения ветровых давлений, поэтому использование всего одного датчика для зоны шириной 22.5° может приводить к слабопредсказуемым результатам. Например, из элементарных физических соображений очевидно, что на напорной стороне фасада должны наблюдаться давления, соответствующие аэродинамическому коэффициенту, близкому к 1.0. При испытаниях в аэродинамической трубе были получены намного меньшие значения, соответствующие аэродинамическому коэффициенту, равному 0.39.

2. Масштабный фактор. Как правило, на очень крупных в плане объектах наблюдаются меньшие аэродинамические коэффициенты на боковых и подветренной сторонах, чем на точно таких же по форме, но малых в плане объектах. Этот эффект связан с влиянием вязких сил трения воздуха (характеризуются числом Рейнольдса). При аэродинамических испытаниях используются масштабные макеты зданий (1:400 для СКК) в то время, как воздушная среда остается натурной (в т.ч. скорость ветра одного порядка с реальной). При таких условиях испытаний получить влияние масштабного фактора оказывается невозможным. Этим можно объяснить более высокие значения отрицательных средних давлений, полученных в испытаниях, по сравнению с данными численного моделирования.

6. Определение снеговых нагрузок

Для определения снеговых нагрузок используются данные СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» (с учетом изменений № 1, 2, 3) и результаты математического (численного) моделирования снеговых нагрузок, представленные в отчете о НИР.

Расчетные значения снеговых нагрузок

Нормативное значение снеговой нагрузки S_0 , действующей на горизонтальную проекцию кровли *Объекта*, следует определять по формуле:

$$S_0 = c_e c_t \mu S_g$$

где:

$S_g = 1.3$ кПа в соответствии с Приложением К к СП;

$c_e = 1.0$ в соответствии с п. 10.6 СП;

$c_t = 1.0$ в соответствии с п. 10.10 СП;

μ – коэффициент формы, определенный по нормативной методике СП 20.13330.2016 и по результатам математического (численного) моделирования снеговых нагрузок.

Для покрытий *Объекта* необходимо рассмотреть пять вариантов нагружения с коэффициентом формы, определяемым в соответствии со схемами Б.1, Б.8 и Б.11 Приложения Б к СП и по результатам математического (численного) моделирования, представленным в отчете о НИР.

Расчетное значение снеговой нагрузки следует определять как произведение ее нормативного значения на коэффициент надежности по нагрузке γ_f . Коэффициент надежности по нагрузке для снеговых нагрузок следует принимать равным 1.4.

Смоделированные коэффициенты формы для расчетных направлений ветра

С применением методики, приведённой в разделе 3.5, варьируя скорость ветра, было выполнено по три аэродинамических расчёта для восьми направлений ветра для *Объекта* ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$) без учёта окружающей застройки. В соответствии с табл. 3.1 СП 131.13330.2020 *Строительная климатология*, средняя скорость ветра на высоте 10 м за зимний период для г. Санкт-Петербург составляет 2.4 м/с (V_{10}). Расчёты проводились для следующих скоростей:

Табл. Значения параметров для расчетных случаев

Номер <i>расчётного случая</i>	Скорость на высоте 10 м V_{10} , м/с	μ_0 (см. раздел 3.5)
1	1.0	0.25
2	3.0	0.75
3	6.0	1.0

Максимальная рассматриваемая скорость ветра 6 м/с принята исходя из опыта расчетных исследований аналогичных объектов и обосновывается существенным преобладанием уноса снега над отложением при больших скоростях ветра – непрезентативная для максимальных снеговых нагрузок ситуация.

Также были приняты следующие значения экспериментальных констант: $A\rho_a = 10^{-4}$ кг·с/м⁴, $w_f = 0.5$ м/с, $u_t = 0.25$ м/с. Концентрация снега C была принята равной 5 г/м³, что соответствует умеренному снегопаду. Для моделирования долгого снегопада, при котором получается неравномерное распределение снега, время отложения T_+ принято равным 12 ч, а время уноса T_- – 240 ч.

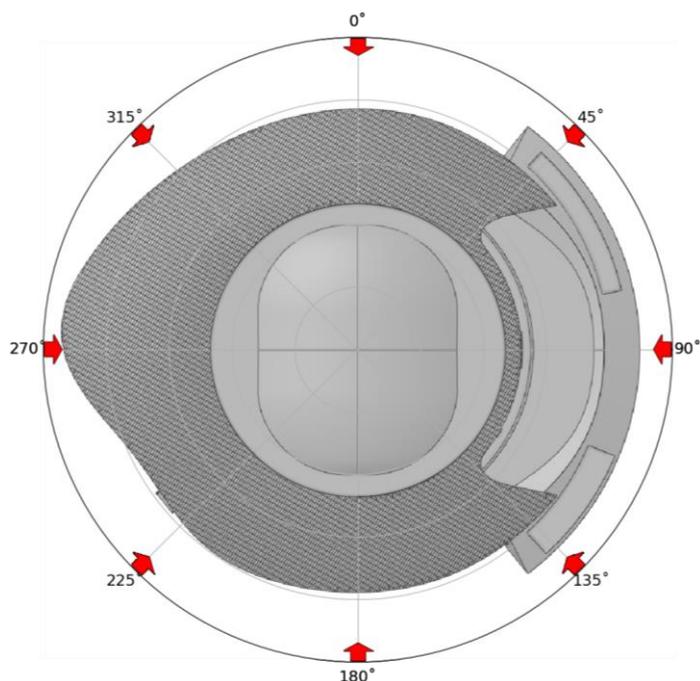


Рис. Расчетные направления ветрового потока покрытий Объекта.

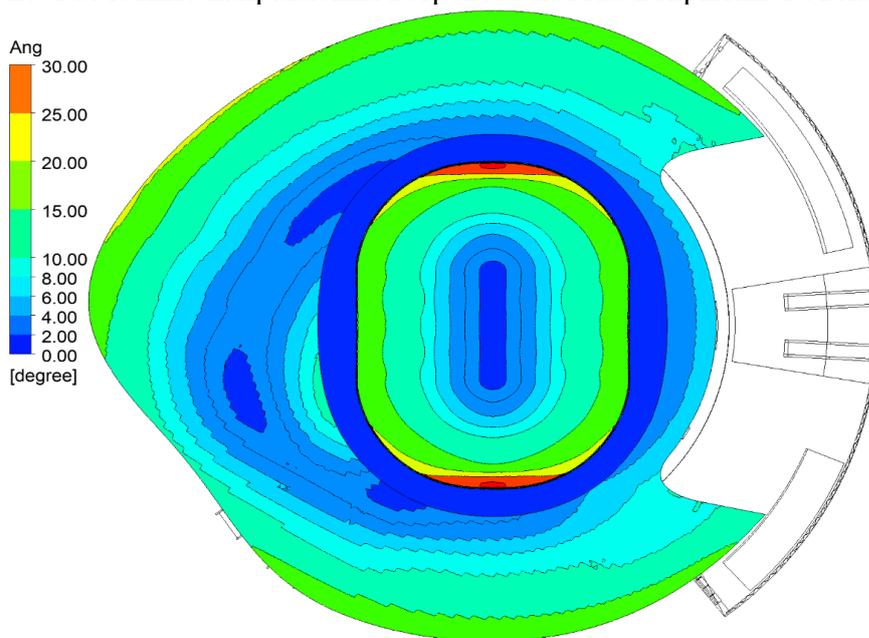


Рис. Углы наклона нормалей поверхности верхнего покрытия Объекта к поверхности земли.

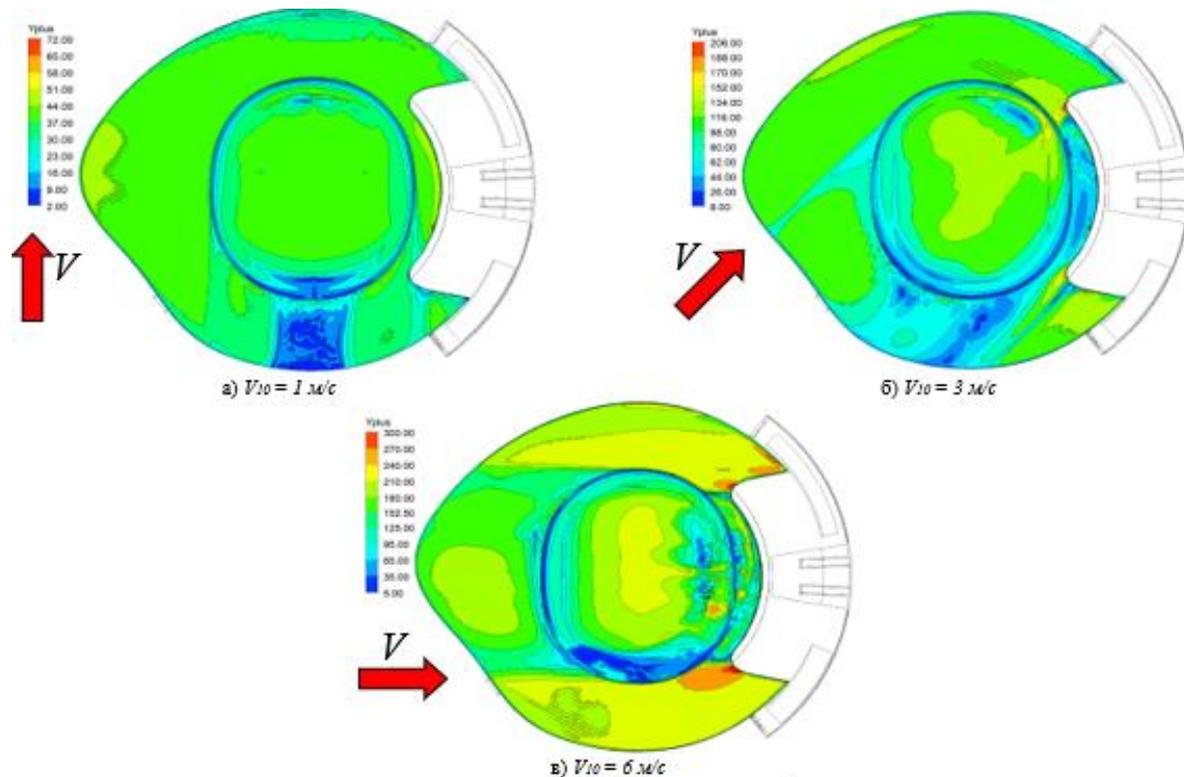


Рис. Величины $u+$ для расчётных скоростей ветра

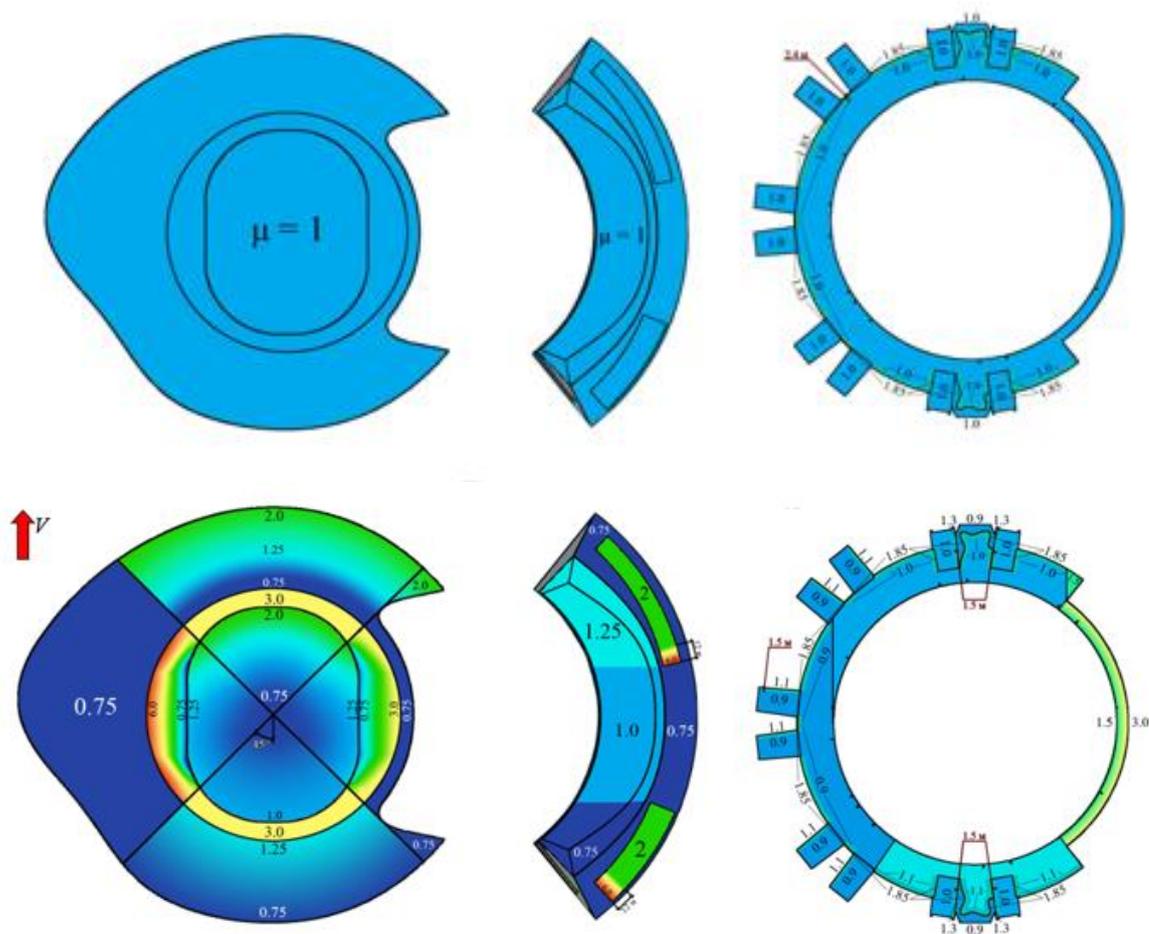


Рис. Различные схемы расчётного коэффициента формы μ для Декоративного козырька, Гостиницы и Стилобата (здесь и далее длина зоны повышенных снегоотложений b_1 у парапетов равна 2.4 м)

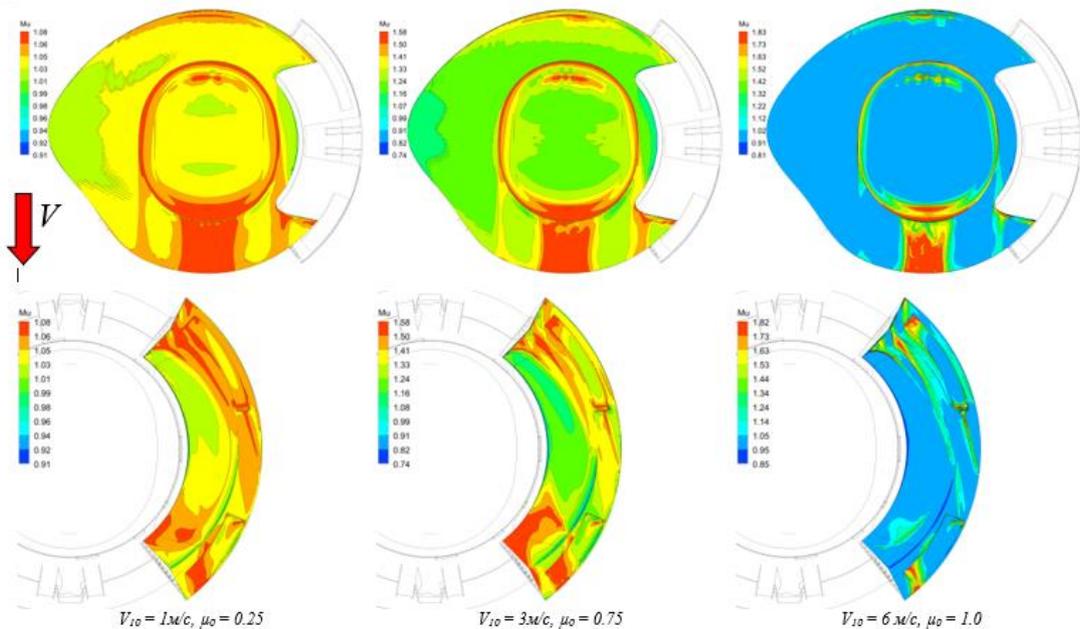


Рис. Смоделированный коэффициент формы μ для Декоративного козырька и Гостиницы для направления ветра 0°

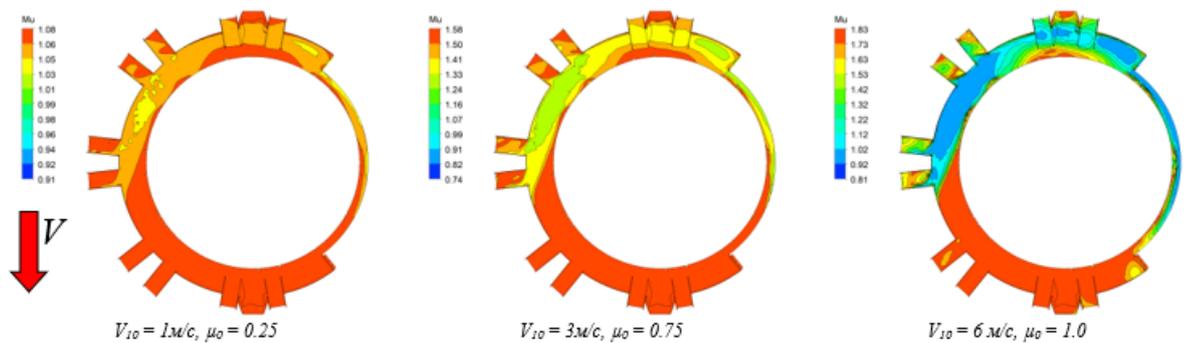


Рис. Смоделированный коэффициент формы μ для *Стилобата* для направления ветра 0°

Сравнение результатов физического и численного моделирования

В рамках комплексного научно-технического сопровождения проектирования Петербургского спортивно-концертного комплекса (далее СКК) было выполнено сравнение результатов физического моделирования в аэродинамической трубе, предоставленных ООО «УНИКОН»**Ошибка! Источник ссылки не найден.**, с результатами численного моделирования для скорости ветра $V_{10} = 6 \text{ м/с}$, $\mu_0 = 1.0$ и выявлено следующее:

1. Методика моделирования снегонакопления и снегопереноса, используемая в эксперименте, распространена в отечественной практике, однако является несколько устаревшей по сравнению с современными методиками, применяемыми за рубежом. В наиболее продвинутом стандарте по моделированию снеговых нагрузок указывается, что в силу несовершенства существующих подходов, необходимо проведение как физического (экспериментального), так и математического (численного) моделирования снегопереноса для последующего составления схем снеговых нагрузок на основе более полного набора данных.

2. Особенности технической реализации масштабного макета для продувки в аэродинамической трубе оказывают влияние на накопление снегоимитатора и,

соответственно, результаты испытаний. Так, на модели присутствует большое число стыковочных рёбер, отсутствующих в проекте. Их наличием обусловлено подавляющее большинство зон накопления снегоимитатора на верхнем покрытии Объекта. Однако рекомендуемые схемы снеговых нагрузок ООО «УНИКОН» учитывают этот факт, игнорируя скопления, обусловленные стыковочными ребрами.

3. Картины распределения снегоимитатора на куполе макета не согласуются со схемами Б.11 Приложения Б к СП 20.13330.2016 (Здания с купольными круговыми покрытиями и близкими к ним по очертанию покрытиями), что может быть обусловлено влиянием козырька и особенностями используемой методики.

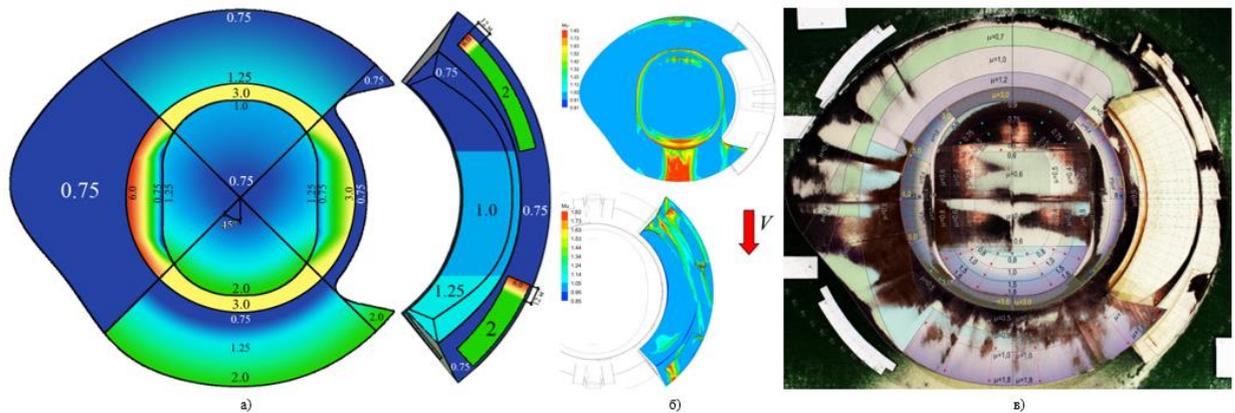


Рис. Сравнение схем расчётного коэффициента формы μ для Декоративного козырька и Гостиницы (а) и результатов численного (б) и физического (в) моделирования для направления ветра 0°

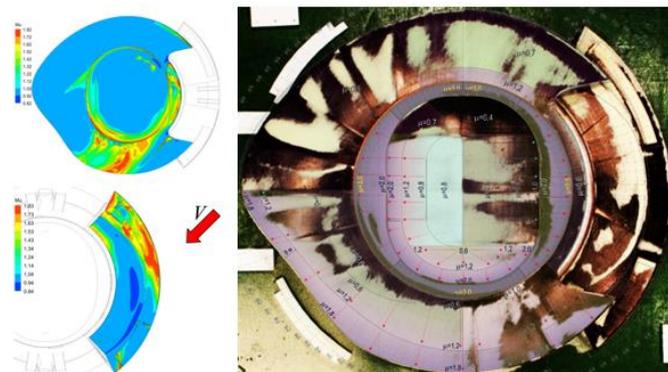


Рис. Сравнение результатов численного (слева) и физического (справа) моделирования для направления ветра 45°

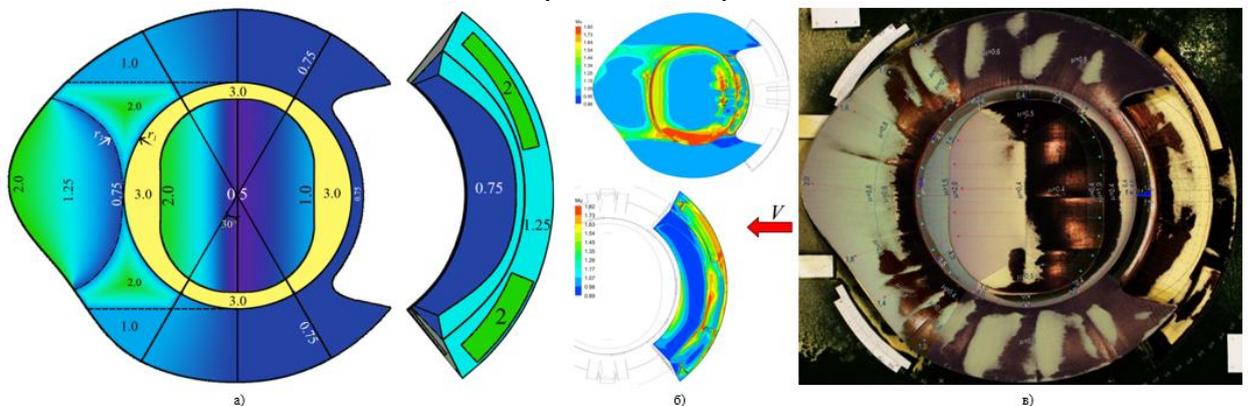


Рис. Сравнение схем расчётного коэффициента формы μ для Декоративного козырька и Гостиницы (а) и результатов численного (б) и физического (в) моделирования для направления ветра 90°

7. Результаты оценки пешеходной комфортности

Форма представления и номенклатура результатов

В данной главе приведены основные результаты выполненных расчетных исследований по оценке ветровой комфортности пешеходных зон Объекта.

Система координат сооружений и расчетные направления ветрового потока показаны на рис. 7.1. Пешеходные зоны объекта показаны на рис. 7.2 – 7.4.

Полученные результаты представлены в следующем виде:

- максимальные значения скорости ветрового потока $V_{max} = V_m (1 + \theta \cdot I)$ в пешеходных зонах для 8-ми характерных направлений ветра ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$);
- расчетные поля коэффициентов усиления скоростей ветра (относительные средние скорости ветра, $V_r = V_m / V_{prof}$, где V_m – средняя расчетная скорость ветра в пешеходной зоне на высоте 1.5 м, V_{prof} – средняя скорость ветра на той же высоте без учета зданий для 8-х характерных направлений ветра ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$);
- вычисленные уровни пешеходной комфортности (повторяемость максимальной скорости ветра) по 3-м нормативно регламентированным критериям ($K_{cr1}, K_{cr2}, K_{cr3}$);
- средневзвешенные для 24-х расчетных направлений ветра значения коэффициента усиления ветра $\overline{V_r}$.

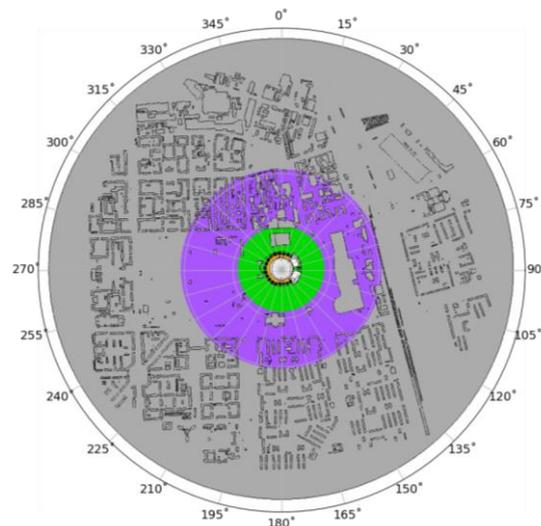


Рис. Система координат и расчетные направления ветрового потока (зеленый, оранжевый и фиолетовый цвета – зоны для оценки параметров ветровой пешеходной комфортности)

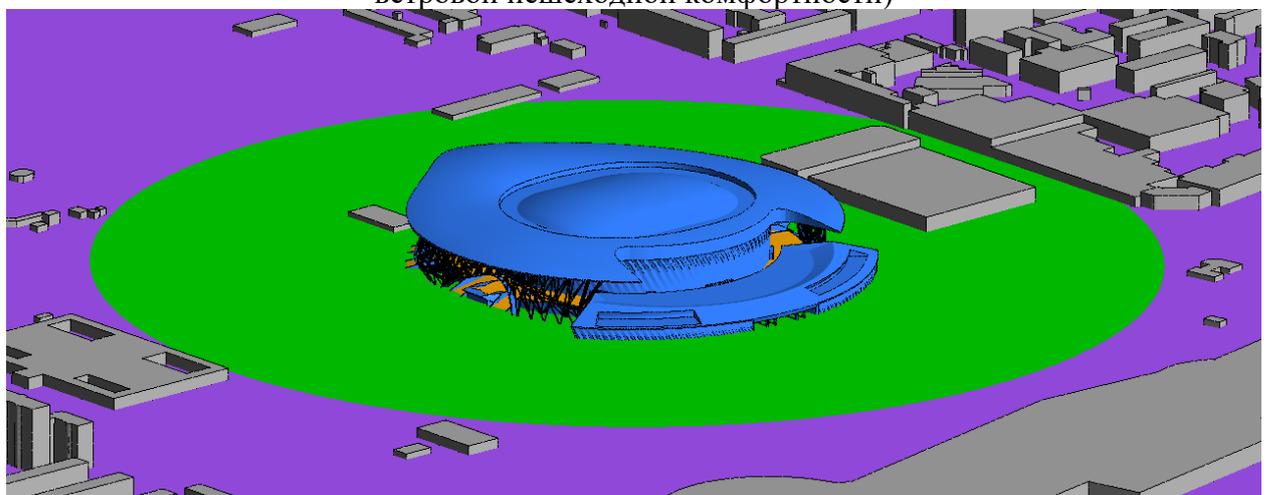


Рис. Зоны оценки параметров ветровой пешеходной комфортности (зеленый и оранжевый цвета). Вид со стороны гостиницы

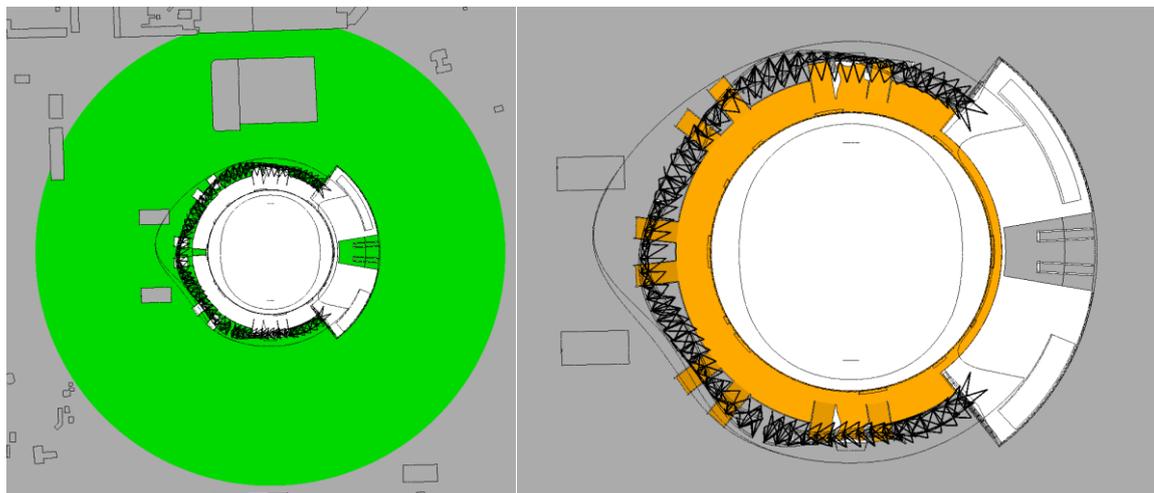


Рис. Зоны оценки параметров ветровой пешеходной комфортности:
Зона 2 (зеленый цвет) - на высоте 1.5 м от поверхности земли в радиусе 345 м от
примерного центра исследуемого Объекта;
Зона 3 (оранжевый цвет) - на высоте 1.5 м от поверхности стилобата

Результаты оценки

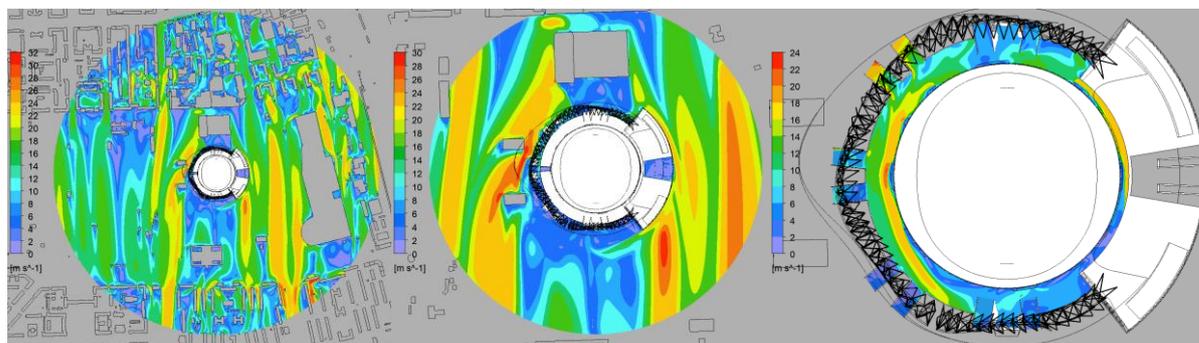


Рис. Максимальные значения скорости ветрового потока в пешеходной Зоне 1.
Угол атаки ветра θ° (Северный)
(ураганный ветер)

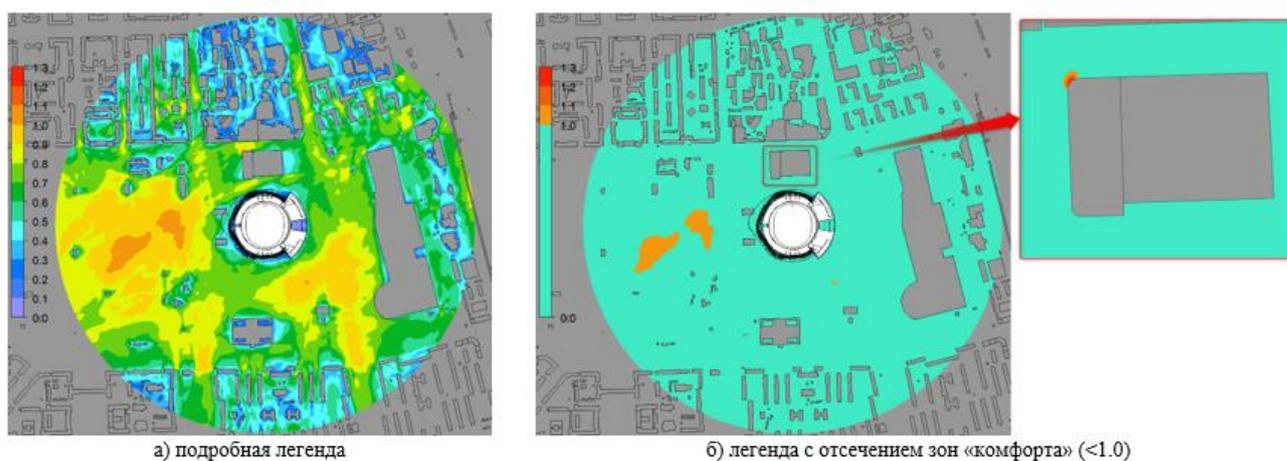


Рис. 7.1. Средневзвешанный коэффициент усиления средней скорости ветра (Зона 1)

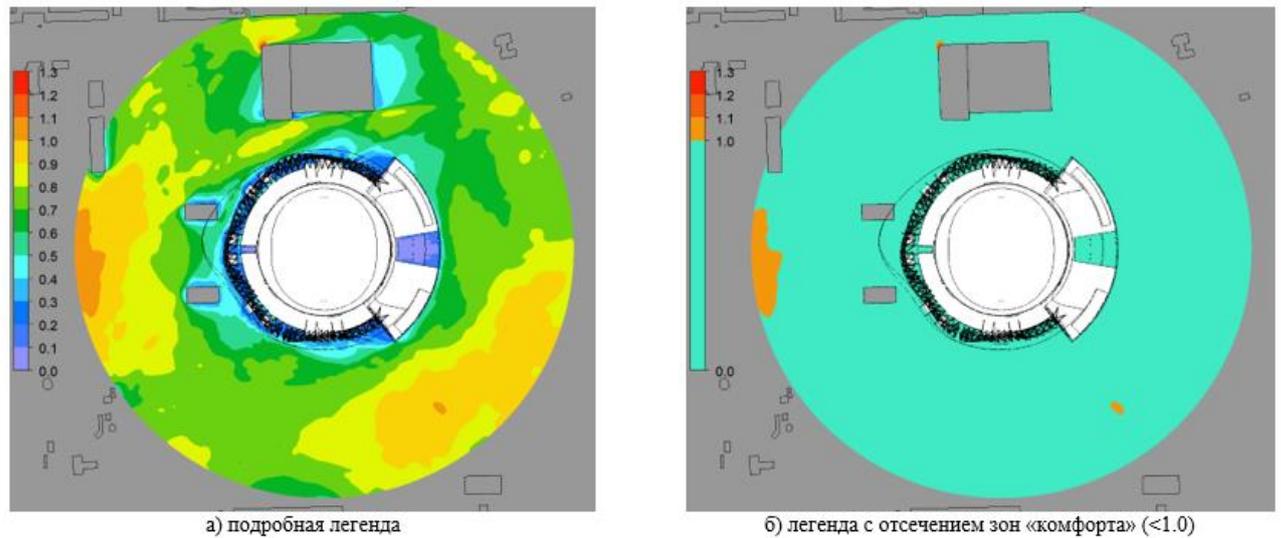


Рис. 7.2. Средневзвешанный коэффициент усиления средней скорости ветра (Зона 2)

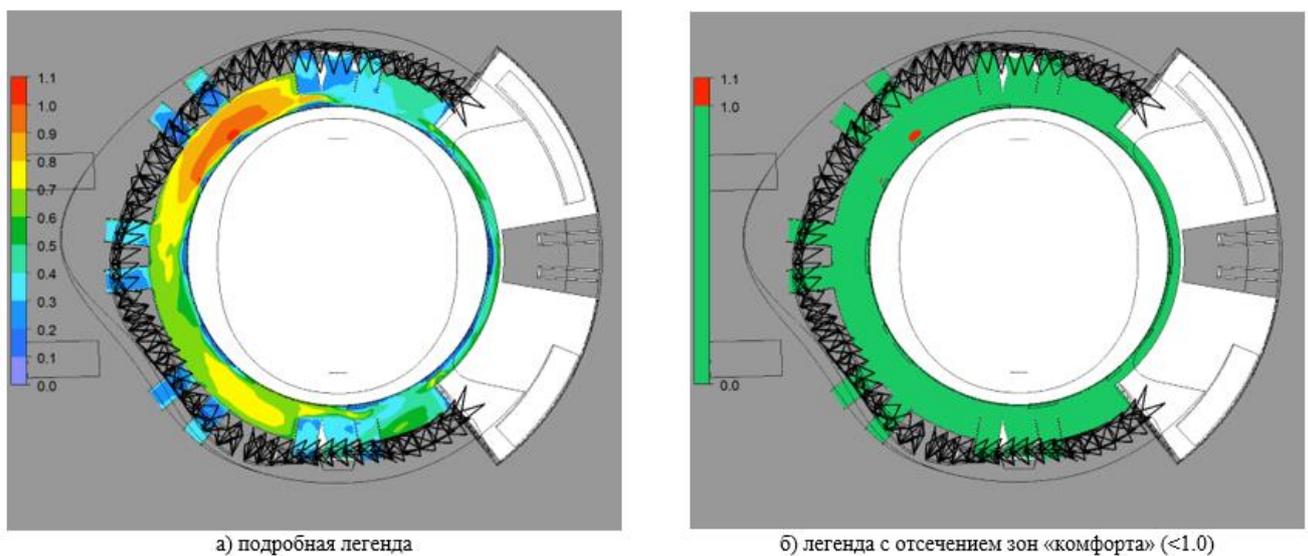


Рис. Средневзвешанный коэффициент усиления средней скорости ветра (Зона 1)

8. Оценка аэроупругой неустойчивости

Аэродинамическая неустойчивость может рассматриваться как процесс, происходящий исключительно внутри самого потока, когда, например, от неподвижного тела отрывается дорожка вихрей или быстро расходящаяся спутная струя. Но если тело в потоке жидкости отклоняется под действием некоторой силы и это начальное отклонение вызывает последующие отклонения, носящие колебательный характер или характер нарастающих во времени перемещений, то в таком случае говорят, что возникает аэроупругая неустойчивость.

Все случаи аэроупругой неустойчивости связаны с самовозбуждающимися аэродинамическими силами, которые действуют на тело вследствие его движения или движения воздушной среды.

Для описания аэроупругих колебаний применяются различные модели, основанные на использовании экспериментальных/натурных данных. Основные виды аэроупругой неустойчивости, модели, описывающие аэроупругие явления, результаты теоретических, численных и экспериментальных исследований этих моделей достаточно подробно описаны в монографиях.

С учетом приведенных в соответствующей главе отчета о НИР описаний аэроупругих явлений и форм собственных колебаний Декоративного козырька, целесообразно провести проверку возможности возникновения вихревого возбуждения и галопирования. Остальные явления аэроупругой неустойчивости для Декоративного козырька невозможны:

- согласно Еурокоду, чтобы быть восприимчивой к дивергенции или флаттеру, конструкция должна быть подобна плоской пластине, а согласно СП центральная ось конструкции должна быть прямолинейной (или близкой к прямолинейной), иметь плавно изменяющиеся формы и размеры поперечного сечения. Таким образом можно заключить, что для Декоративного козырька явления дивергенции или флаттера *невозможны*.

- СКК находится на достаточном удалении от других крупных сооружений, а те, что находятся вблизи, существенно ниже СКК, поэтому явление бафтинга *невозможно*.

Разработка расчетной модели и определение аэродинамических характеристик

Рассматривается характерное сечение Декоративного козырька.

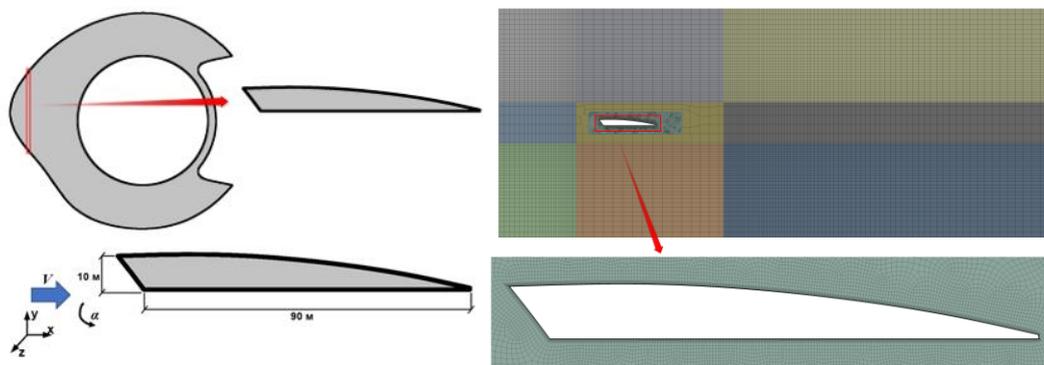


Рис. Схема рассматриваемой секции и конечнообъемная сетка

Результаты нестационарных расчетов

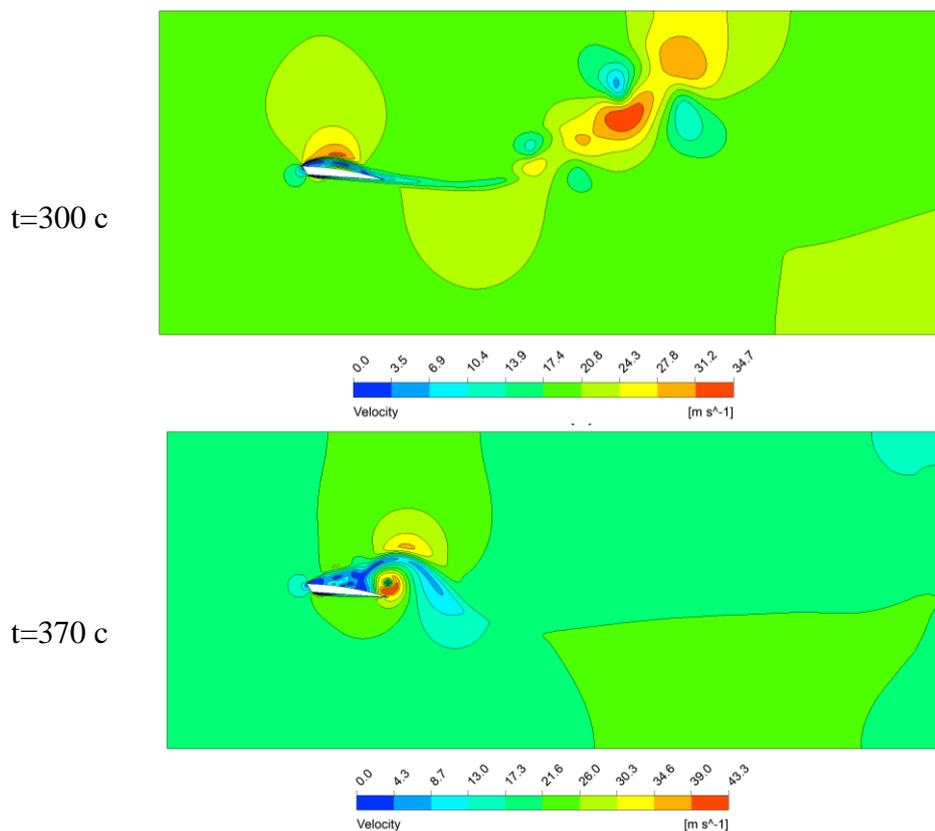


Рис. Изополе скоростей [м/с] в физические моменты времени. Угол $\alpha = -4^\circ$

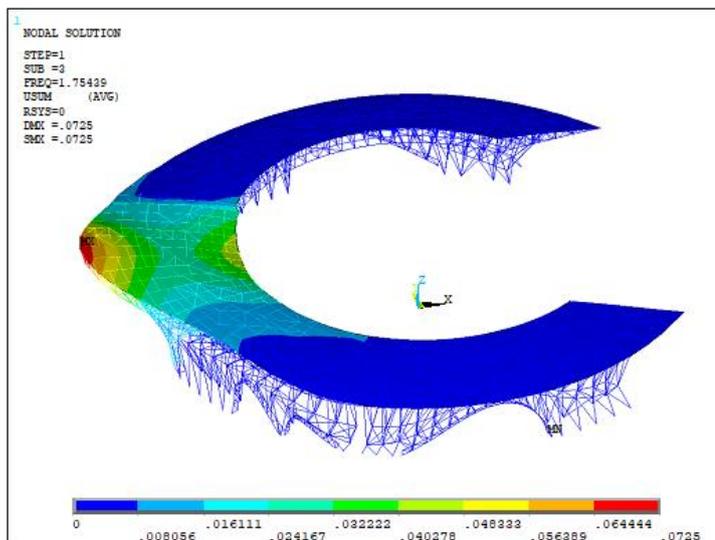


Рис. Собственный вес. Форма собственных колебаний 3

Галопирование, оценка по нормативной методике

В отечественных нормах СП и в Eurocode приводится рекомендация для оценки возникновения эффекта галопирования.

В Eurocode указано, что некруглые поперечные сечения, включая сечения I-, U-, L- и T-образной формы, склонны к возникновению галопирования. Для круглых сечений галопирование невозможно, т.к. характер обтекания не меняется с изменением угла атаки ветра, однако наличие обледенения на круглых сечениях может привести к возникновению аэроупругих явлений галопирования. Колебания при галопировании начинаются с определенной начальной скорости $V_{cr,g}$, называемой критической. Амплитуды колебаний в этом случае быстро растут с увеличением скорости ветра.

Ниже в таблице 8.1 представлены значения критических скоростей, вычисленных по формуле.

Максимально возможная скорость ветра для места строительства (отметка 44 м):

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2w_0 k(z) \gamma_f}{\rho_a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 300 \text{ Па} \cdot 1.176 \cdot 1.4}{1.25 \text{ кг/м}^3}} = 28.11 \text{ м/с}$$

Таблица 8.1. Значения критических скоростей $V_{cr,g}$

Угол, °	C_D	C_L	C_L'	a_g	$V_{cr,g} [\text{м/с}]$
-10	0.44	1.08	17.14	16.80	-
-8	0.51	1.66	17.14	16.80	-
-6	0.40	1.45	-6.26	-6.14	4.97
-4	0.29	1.15	-8.77	-8.59	3.43
-2	0.19	0.83	-9.19	-9.01	3.23
0	0.12	0.39	-12.96	-12.70	2.27
2	0.08	0.22	-4.88	-4.78	6.06
4	0.08	0.24	0.45	0.44	-
6	0.10	0.07	-4.89	-4.79	6.07
8	0.13	-0.14	-6.33	-6.20	4.69
10	0.15	-0.23	-2.62	-2.57	11.77

Выводы и рекомендации

По результатам выполненного комплексного аэродинамического исследования по проектируемому Объекту «Петербургского спортивно-концертного комплекса» (г. Санкт-Петербург) 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 24 расчетных случаев (8 направлений ветра и 3 различных скоростей ветра).

3. Определены расчетные средние и пульсационные составляющие ветровых нагрузок на несущие конструкции Объекта. Выявлены наиболее опасные и характерные направления ветра для отдельных элементов Объекта.

Перечисленные в отчете о НИР расчетные случаи рекомендуются к учету в прочностных расчетах, а соответствующие схемы и значения ветровых нагрузок. Дополнительно рекомендуются к учету ветровые нагрузки на несущие конструкции по данным физического моделирования, основанным на продувке экспериментальной модели в АДТ ООО «УНИКОН».

4. Определены пиковые ветровые давления на ограждающие конструкции Объекта (Декоративный козырек, купол, светопрозрачный фасад, гостиница, гостиница).

В прочностных расчетах ограждающих (фасадных) конструкций рекомендуется использовать значения пиковых ветровых давлений, представленные в отчете о НИР. Дополнительно рекомендуются к учету пиковые ветровые давления на фасадные конструкции по данным физического моделирования, основанным на продувке экспериментальной модели в АДТ ООО «УНИКОН».

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. 6.4-6.13 настоящего отчёта, полученные по схемам Б.1, Б.8 и Б.11 Приложения Б к СП 20.13330.2016 (с изм. №3) и по результатам математического (численного) моделирования. Дополнительно рекомендуются к учету коэффициенты формы μ по данным физического моделирования, основанным на продувке экспериментальной модели в АДТ ООО «УНИКОН».

6. Относительно крупная зона ветрового «дискомфорта» выявляется к западу от Объекта на территории Московского парка Победы, растительность которого не учитывалась в расчетах. Поэтому реальная ситуация с ветровой комфортностью пешеходных зон с западной стороны вероятно существенно лучше расчетной

Две небольшие зоны ветрового «дискомфорта»: у угла здания к северу от Объекта и над стилобатной частью СКК, не требуют принятия специальных мер (озеленение, организация малых архитектурных форм.)

В итоге можно заключить, что ветровая комфортность пешеходных зон Объекта обеспечена.

7. На основе всестороннего аналитического обзора установлено, что для *Декоративного козырька* явления ***аэроупругой неустойчивости невозможны***:

- согласно Еврокоду, чтобы быть восприимчивой к дивергенции или флаттеру, конструкция должна быть подобна плоской пластине, а центральная ось конструкции должна быть прямолинейной (или близкой к прямолинейной), иметь плавно изменяющиеся формы и размеры поперечного сечения. В силу сказанного можно заключить, что для Декоративного козырька явления ***дивергенции*** или ***флаттера невозможны***.

- СКК находится на достаточном удалении от других крупных сооружений, а те, которые находятся вблизи, по высоте меньше СКК, поэтому явление ***бафтинга невозможно***.

- согласно критериям СП 20 и Eurocode и численной оценки числа Струхала для секции *Декоративного козырька*, скорость вихревого возбуждения уже для 1-ой частоты собственных колебаний на два порядка превышает максимально возможную. Таким образом, ***вихревое возбуждение*** для *Декоративного козырька невозможно.*

- согласно СП *галопирование* как вид аэродинамической неустойчивости колебаний «необходимо учитывать для зданий, сплошностенчатых сооружений или их отдельных участков, имеющих прямолинейную (или близкую к прямолинейной) центральную ось, а также неизменяющиеся или плавно изменяющиеся формы и размеры поперечного сечения...». Репрезентативный опыт ЗАО НИЦ СтаДиО и рассмотренные эксплуатируемые объекты-аналоги также подтверждают, что существенно трехмерная форма *Декоративного козырька*, система опирания и стилобат, выступающие турбулизаторами потока, сводят к ничтожной вероятности возникновения ***галопирования, не требующего учета при проектировании и расчетном обосновании***.

8. Рекомендуется в разрабатываемой системе мониторинга предусмотреть наблюдение за отклонениями и колебаниями Декоративного козырька при значимых ветровых воздействиях (скоростях ветра).