

Научно-исследовательский центр СтаДиО

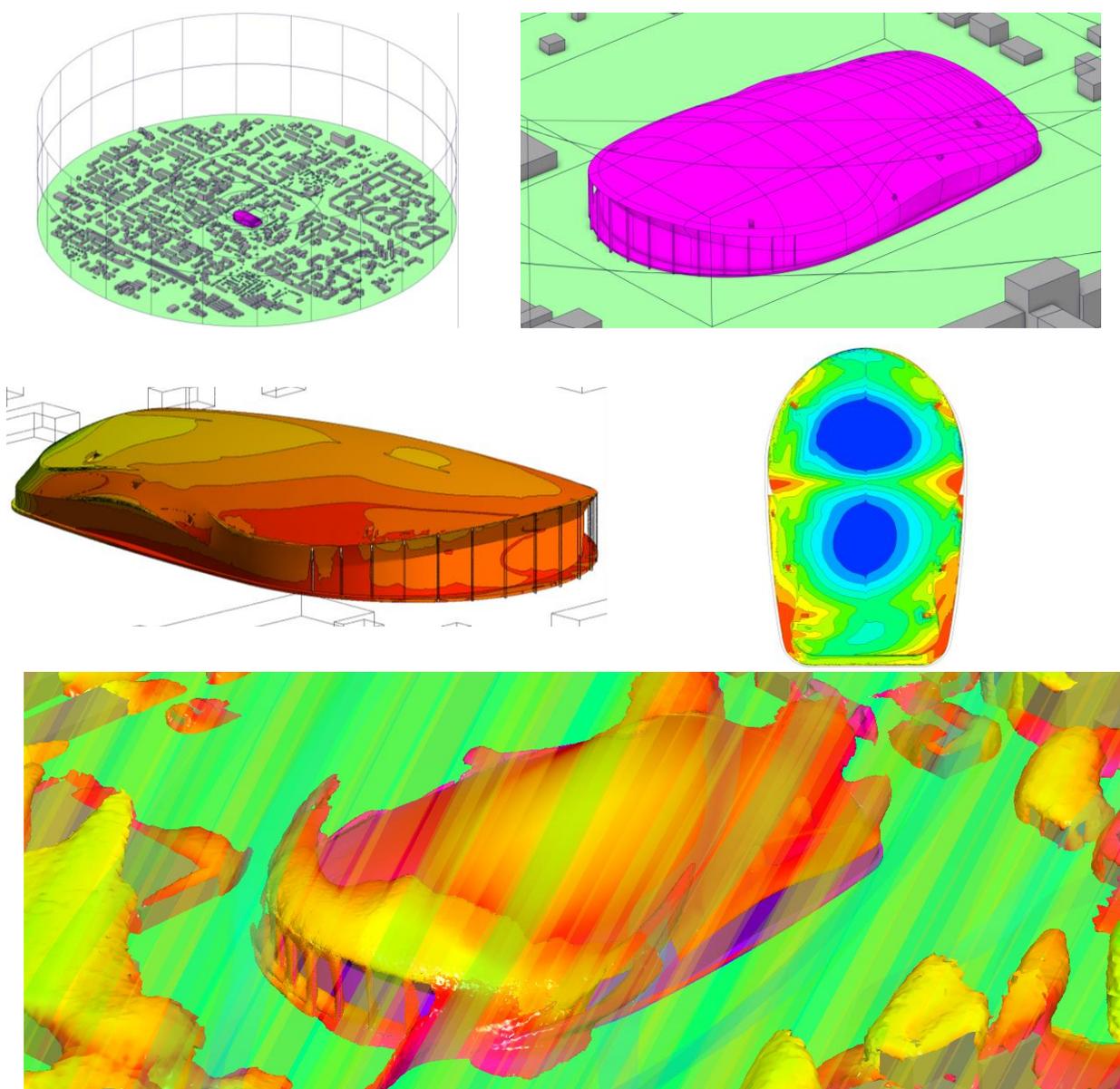
Свидетельство СРО «АПОЭК» - Ассоциации «Проектировщики оборонного и энергетического комплексов»
Номер решения о приеме в члены СРО № 06-ПСС-38/2018 от 20.06.2018 г.

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. № САХЗ-2021-11/22-2

Научно-технический отчет

Разработка рекомендаций по назначению ветровых и снеговых нагрузок на проектируемую Ледовую арену в г. Южно-Сахалинск, на основе численного решения трехмерных задач аэродинамики. В рамках проектирования объекта «Ледовая арена»



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 рельефа местности, перспективной окружающей застройки и различных направлений ветра.
- 3) Выявление наиболее опасных и характерных направлений ветра на основе анализа суммарных ветровых нагрузок на несущие конструкции сооружений, полученных в результате численного моделирования.
- 4) Определение расчетных средних и пульсационных составляющих ветровой нагрузки на несущие конструкции для исследуемых направлений ветра.
- 5) Определение распределения пикового (минимального и максимального) ветрового давления на ограждающие конструкции Объекта.
- 6) Определение распределения снеговых нагрузок на конструкции покрытия Объекта на основе нормативных методик.

Площадка строительства, рельеф и застройка объекта

Земельный участок под строительство Ледовой арены (далее Объект) расположен в городе Южно-Сахалинск. Территория строительства ограничена с севера Пограничной улицей, с запада – улицей Пушкина, с юга и востока – окружающей застройкой.

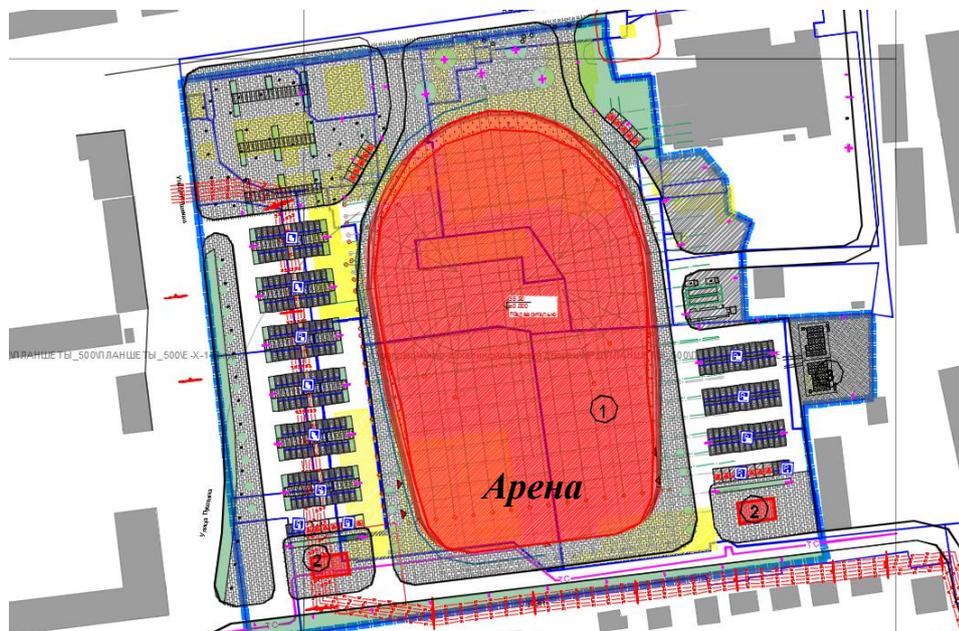


Рис. Схема планировочной организации земельного участка

Согласно схематической карте климатического районирования (по СП 131.13330.2020) район строительства относится к II климатическому району, подрайону II-Г. Климат муссонный умеренных широт. Среднегодовая температура воздуха 2,8 °С. Среднегодовой уровень осадков 861 мм.

Согласно СП 20.13330.2016 площадка строительства находится в **VI ветровом районе** (нормативное значение ветрового давления $w_0 = 0.73 \text{ кПа}$) и **VIII снеговом районе** (нормативное значение веса снегового покрова $S_g = 3.85 \text{ кПа}$ согласно таблице К.1). При определении ветровых нагрузок следует принять тип местности В.

Рельеф острова Сахалин и, в частности города Южно-Сахалинск, представлен средневысокими горами, низкогорьями и низменными равнинами. Площадка строительства объекта находится в крайней черте города и характеризуется достаточно резким «подъемом в гору». Такой сложный рельеф оказывает существенное влияние на ветровые потоки вокруг объекта и обязателен к учету в аэродинамических расчетах.

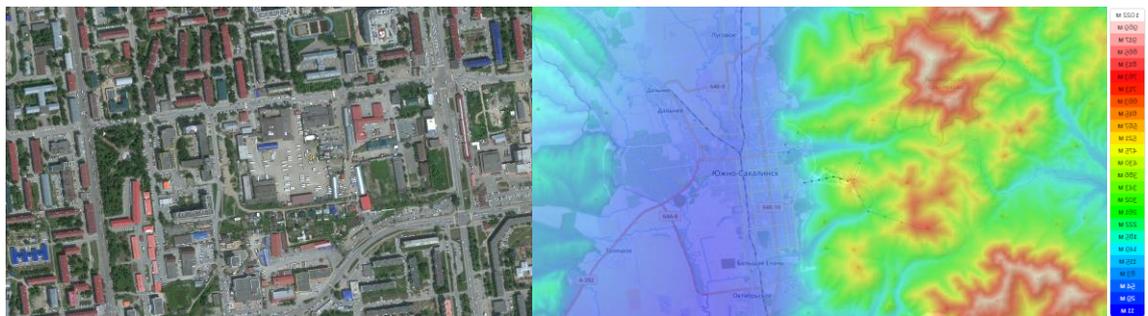


Рис. Карта местности и рельефа возле площадки строительства

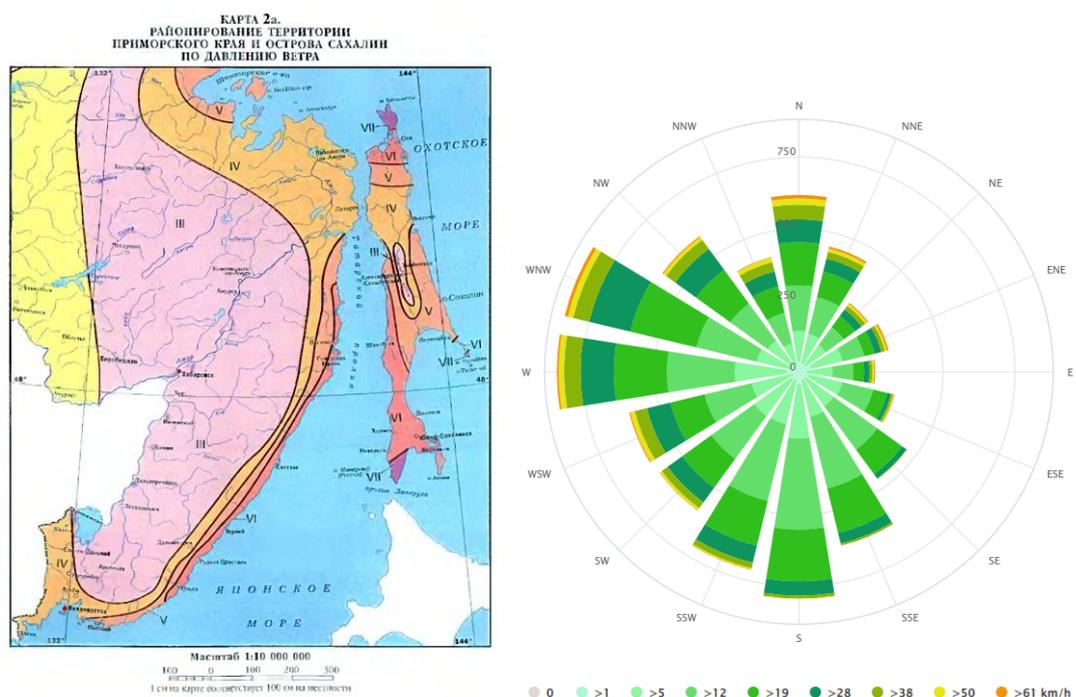


Рис. Карта районирования по давлению ветра и роза скоростей ветра для города Южно-Сахалинск

2. Разработка и верификация расчётных моделей

Для определения ветровых и снеговых нагрузок была создана расчетная модель с учётом окружающей Объект застройки и сложного рельефа местности.

Геометрическая модель

Практическая подготовка расчетных моделей начинается с создания геометрической объемной модели Объекта и рельефа окружающей местности. Геометрия зданий и сооружений Объекта выполнена согласно исходным данным. Рельеф учитывался

упрощенно на основе генерального плана. Объемные геометрические модели создавались в модуле ANSYS SpaceClaim.

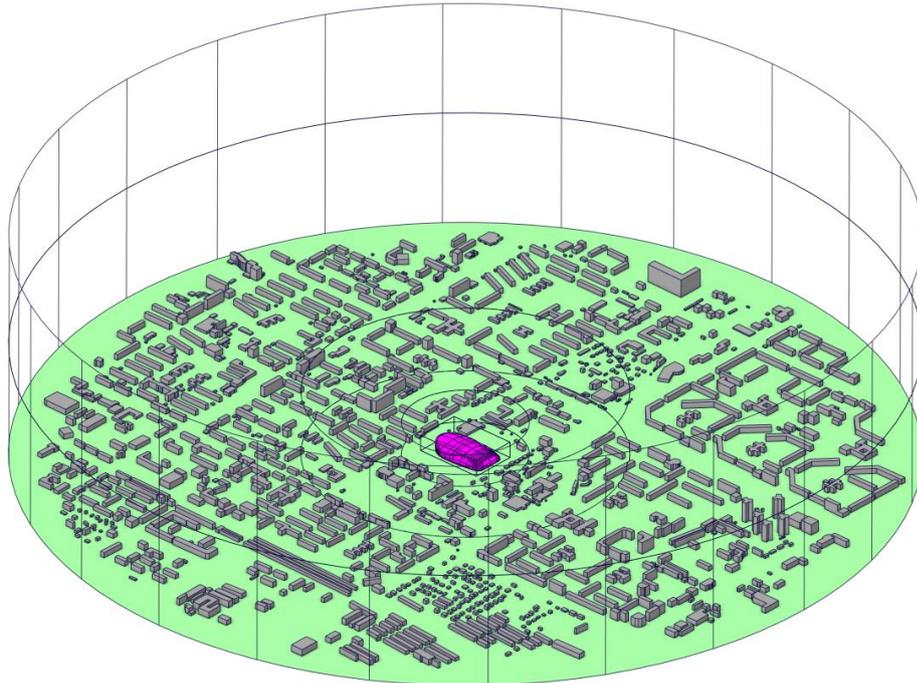


Рис. Модель с учётом застройки. Геометрическая модель. Общий вид Фиолетовым выделен исследуемый объект, серым – неисследуемая застройка.

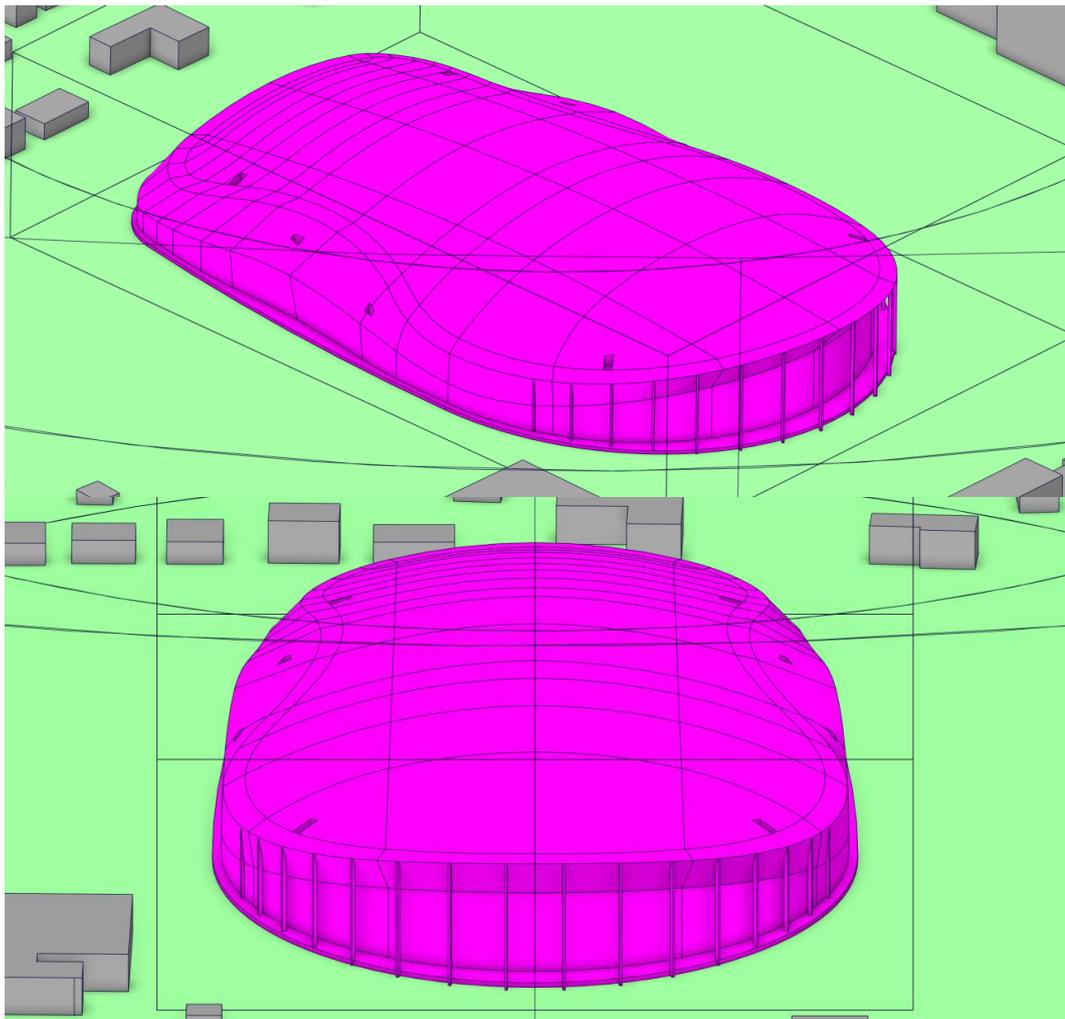


Рис. Модель с учётом застройки. Геометрическая модель. Виды вблизи Объекта

Конечнообъемные сетки

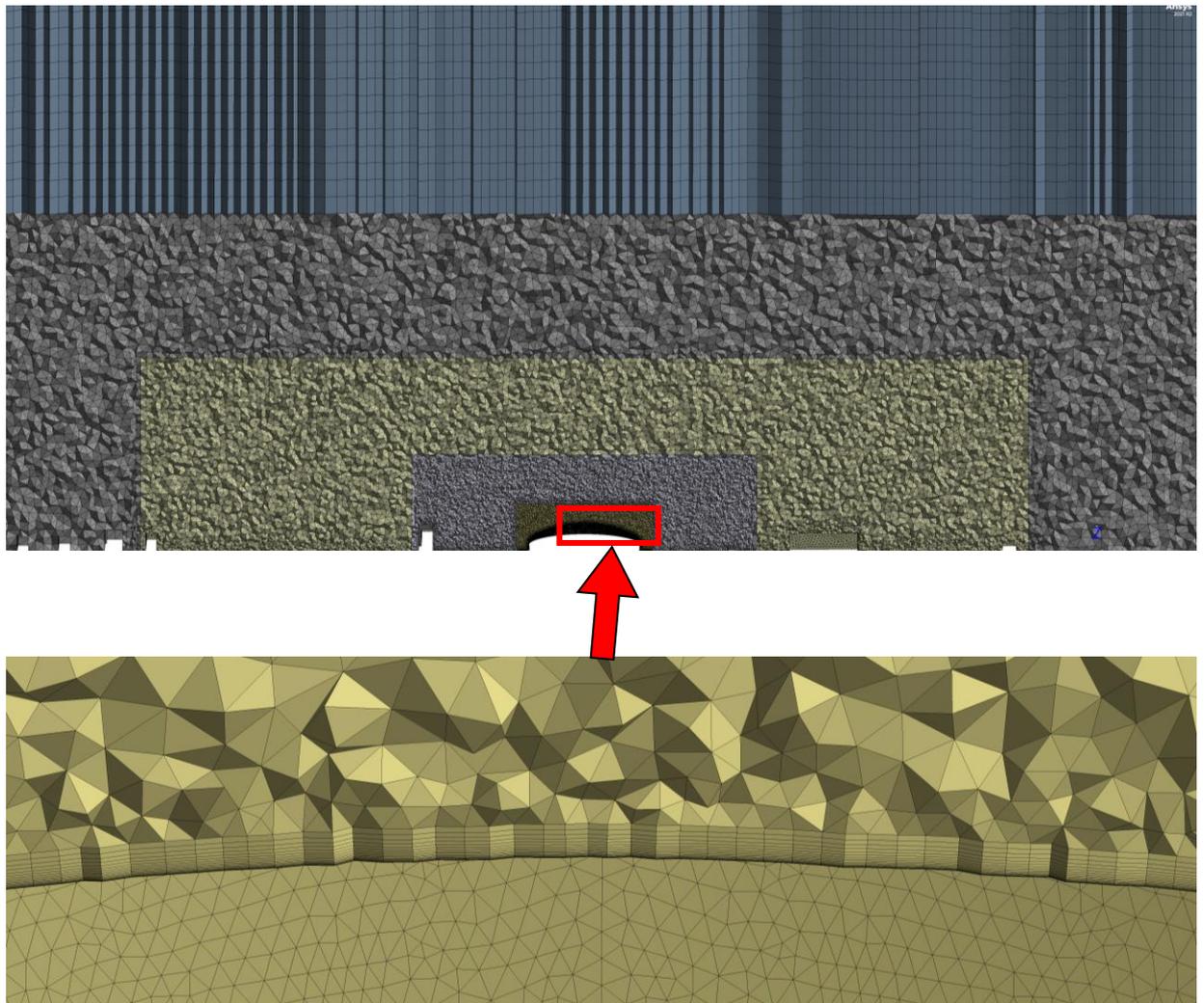


Рис. Модель с учётом застройки. Разрез конечнообъемной сетки

Граничные условия

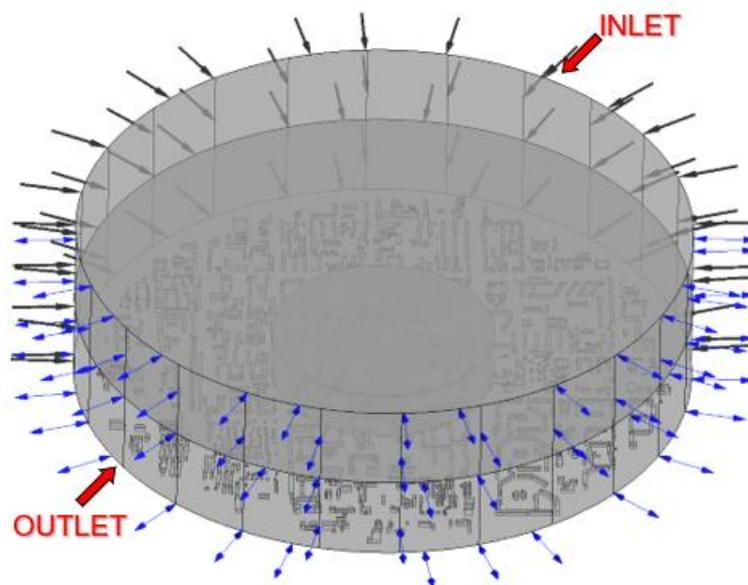


Рис. Расчетная область Модели с учётом застройки (ANSYS CFX) с обозначенными граничными условиями. Угол атаки 0°

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.

Начало координат находится приблизительно в геометрическом центре плана Объекта на отметке 0 м). Ось X ориентирована с З на В со сдвигом на 8° по часовой стрелке, ось Y – с Ю на С со сдвигом на 8° по часовой стрелке, ось Z – вверх. Угол атаки ветра (Угол, °) отсчитывается от Севера по часовой стрелке.

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 Объекта 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 окружающей застройки представлены в табличном виде и в форме графиков;

– средняя (P , Па) и пульсационная (P_{puls} , Па) составляющие ветрового давления, суммарное ветровое давление (P_{sum} , Па) для соответствующих компонент (поверхностей сбора аэродинамической нагрузки) в табличном виде.

Ветровые нагрузки на ограждающие (фасадные) конструкции:

– огибающие максимального и минимального значений давления на ограждающие (фасадные) конструкции Объекта для всех направлений ветра;

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

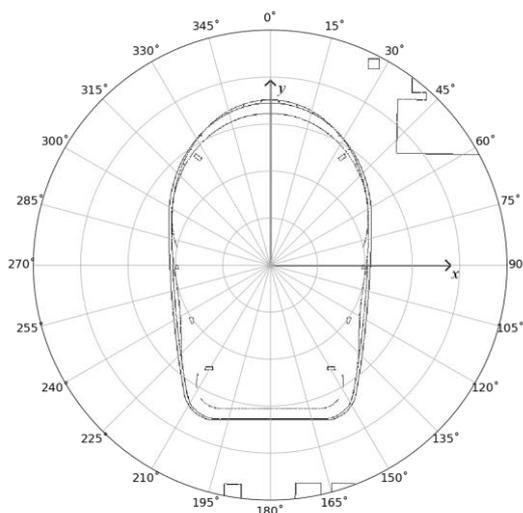


Рис. Система координат и расчетные направления ветрового потока.

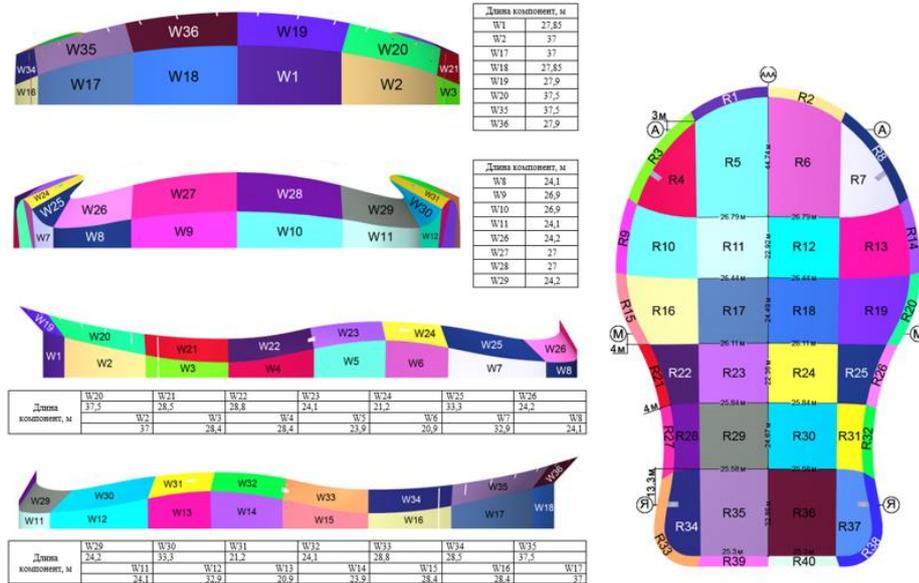


Рис. Внешний вид номенклатуры компонент стен и покрытия Объекта 5.2 Ветровые нагрузки на несущие конструкции

В пункте представлены:

- суммарные расчетные ветровые нагрузки на несущие конструкции в упомянутых выше осях (F_x , F_y , кН), векторная сумма нагрузки (F_R , кН), суммарная вертикальная сила (F_z , кН) для 24-х направлений (шаг по углу 15°) в табличном виде и в форме графиков;
- средняя (P , Па) и пульсационная (P_{puls} , Па) составляющие ветрового давления, суммарное ветровое давление ($P_{sum} = P + k_{puls} \cdot P$, Па) для соответствующих компонент (поверхность сбора аэродинамической нагрузки) в табличном виде. Положительным значениям давления соответствует «напор», а отрицательным – «отсос» (вакуум). Результаты представлены для характерных углов и наиболее опасных с точки зрения несущих конструкций направлений ветра (с реализацией максимального значения векторной суммы нагрузки и вертикальной силы). $k_{puls} = P_{puls} / |P|$ – коэффициент пульсаций.

Таблица. Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y) и векторная сумма нагрузки (F_R) в зависимости от направления ветра.

Угол, °	С учётом застройки		
	F_x , тс	F_y , тс	F_R , тс
0	-24.4	-77	80.8
15	-5.3	-19	19.8
30	-10.5	-26.1	28.1
45	-7.6	-49.2	49.7
60	-62.5	-19.5	65.5
75	-11	-12.5	16.7
90	-88	0	88
105	-47.4	-26.4	54.2
120	-48.7	-12.6	50.3
135	-99.9	27.7	103.6
150	-96.8	46.2	107.3
165	-48	39.5	62.2
180	-0.5	15.7	15.7
195	-18.2	44.1	47.7
210	50.4	-0.5	50.4
225	62.1	-4.1	62.3
240	46.2	-21.1	50.8
255	67.9	-7.6	68.3
270	52.9	0.7	53
285	62.1	-3.2	62.2
300	69.2	-14.6	70.7
315	-4.4	-36.7	37
330	5	-19.5	20.1
345	9.5	-18.8	21

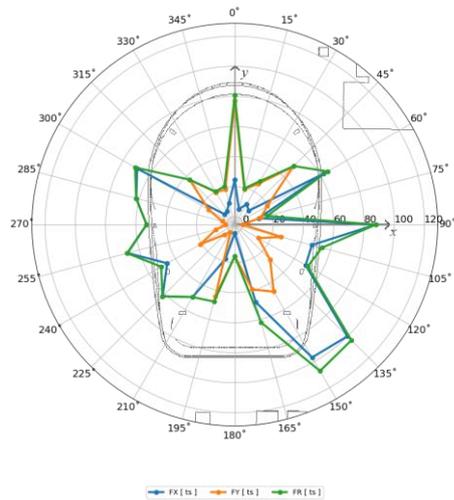


Рис. Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y) и векторная сумма нагрузки (F_R) в зависимости от направления ветра на несущие конструкции *Объекта*, тс (значения приведены по модулю)

Таблица. Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_z) на *Объекте* в зависимости от направления ветра.

Угол, °	С учётом застройки
	F_z , тс
0	88.2
15	31.2
30	104.8
45	225.7
60	472.3
75	194.6
90	460.7
105	317.4
120	202
135	199.5
150	119.6
165	28.9
180	-11.7
195	63.9
210	129.9
225	274.1
240	255.2
255	296.8
270	281.5
285	303.6
300	253.2
315	275.7
330	144.2
345	105.4

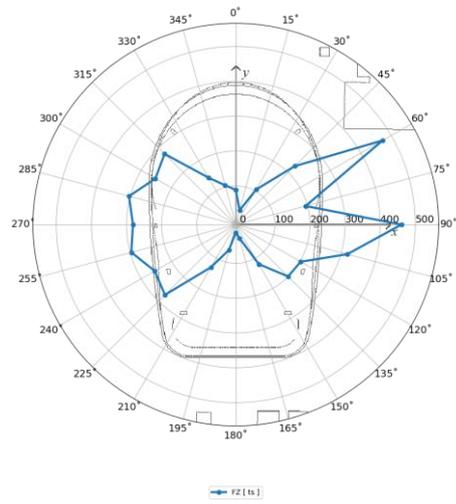


Рис. Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_z) в зависимости от направления ветра на несущие конструкции Объекта, тс

Таблица Составляющие ветрового давления (P – средняя, P_{puls} – пульсационная, P_{sum} – суммарная, Па) для соответствующей компоненты. Объект с учётом окружающей застройки. Угол атаки ветра 0° .

Комп.	P	P_{puls}	P_{sum}	Комп.	P	P_{puls}	P_{sum}	Комп.	P	P_{puls}	P_{sum}	Комп.	P	P_{puls}	P_{sum}
R1	38.9	155.6	194.5	R21	-75.4	115.9	-191.3	W1	380.6	249.8	630.4	W19	393.3	484	877.4
R2	-64.3	143	-207.3	R22	-88.6	130.2	-218.8	W2	139.9	158.7	298.6	W20	122	272.4	394.5
R3	3.4	84	87.4	R23	-87.9	135.4	-223.2	W3	-61.2	107.3	-168.6	W21	-87.8	146.5	-234.3
R4	-18.5	72.7	-91.3	R24	-50.9	98.5	-149.4	W4	-39.5	63.2	-102.7	W22	-50.7	82.5	-133.2
R5	5.7	72.6	78.3	R25	-12.5	42.1	-54.7	W5	-30.1	51.6	-81.7	W23	-59.5	97.7	-157.2
R6	-3.3	52.9	-56.3	R26	5.1	24.8	29.9	W6	-20	40.6	-60.6	W24	-81.5	116.5	-198
R7	-23.4	53.4	-76.7	R27	-79	121.6	-200.6	W7	-74.6	61.9	-136.5	W25	-62.7	82.9	-145.6
R8	-42.8	69.1	-111.9	R28	-86.5	128.6	-215.1	W8	-40.3	66	-106.3	W26	-337	219.7	-556.7
R9	-45.9	89.8	-135.7	R29	-84.7	131.6	-216.3	W9	-116.6	123.9	-240.5	W27	-320.1	189.7	-509.9
R10	-55.6	97.4	-153	R30	-42.8	88.5	-131.3	W10	-57.2	95.4	-152.5	W28	7.8	73.7	81.6
R11	-63.9	115.4	-179.3	R31	-2.3	31.6	-33.9	W11	-18.4	83.5	-101.9	W29	75.3	54.4	129.7
R12	-40.3	88.6	-128.8	R32	13.8	38.5	52.2	W12	70.4	43.8	114.2	W30	62.8	45.3	108.1
R13	-18.2	47.2	-65.4	R33	-257.8	209.6	-467.5	W13	51.3	37	88.3	W31	24.7	43.7	68.4
R14	-32	58	-90	R34	-137.5	157.5	-295	W14	29.4	32.6	62	W32	18.6	40.4	58.9
R15	-74.4	115.8	-190.3	R35	-108.4	146.6	-254.9	W15	14.2	23.1	37.3	W33	-4.1	43.1	-47.2
R16	-76.5	118.3	-194.7	R36	-27.4	70	-97.4	W16	-39.3	62.6	-101.9	W34	-63	90.6	-153.5
R17	-82.7	131.7	-214.4	R37	25.8	48.2	74	W17	-3.4	88.5	-91.9	W35	-14.2	117.7	-131.8
R18	-50.5	99	-149.6	R38	46.3	55	101.3	W18	305.7	244.5	550.2	W36	325.9	424.2	750.1
R19	-13	41.1	-54.1	R39	-327.3	262.1	-589.4								
R20	-11.7	39	-50.8	R40	-42.4	79.2	-121.6								

Пиковые ветровые нагрузки на ограждающие конструкции

На рис. и в табл. показаны огибающие максимального и минимального значений ветрового давления на ограждающие (фасадные) конструкции Универсального спортивного комплекса с учетом и без учета окружающей застройки в зависимости от направления ветра. При каждом направлении ветра выбирается максимальное и минимальное значение ветрового давления среди его значений в узлах расчетной сетки по всей поверхности Объекта.

В табл. цветом выделены пиковые (минимальные и максимальные) значения:

- оранжевым цветом – наибольшая положительная ветровая нагрузка на ограждающие конструкции;
- голубым цветом – наибольшая отрицательная ветровая нагрузка на ограждающие конструкции.

На рис. для расчётного случая с учётом окружающей застройки в графическом виде представлены:

- изополя верхней огибающей максимальных значений ветрового давления;
- изополя нижней огибающей минимальных значений ветрового давления;
- изополя соответствующих углов атаки ветра, при которых реализуются эти огибающие.

Таблица. Огибающие минимального и максимального значений ветрового давления на ограждающие (фасадные) конструкции Объекта

Угол, °	С учётом застройки	
	Р _{МИН} , Па	Р _{МАХ} , Па
0	-2710	1244
15	-988	928
30	-904	986
45	-3619	713
60	-3014	1761
75	-754	535
90	-1926	1201
105	-2260	682
120	-1937	622
135	-3012	696
150	-1341	842
165	-762	785
180	-434	450
195	-1411	937
210	-1853	491
225	-1368	689
240	-1816	481
255	-1517	1115
270	-878	480
285	-1158	751
300	-1139	1022
315	-3075	338
330	-687	527
345	-2362	1127

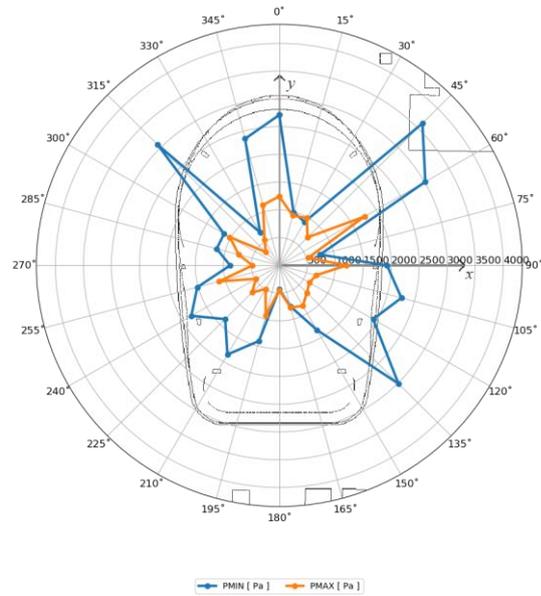


Рис. Огибающие максимального (оранжевая линия) и минимального (синяя линия) пиковых значений давления на ограждающие (фасадные) конструкции Объекта в зависимости от направления ветра, Па (значения приведены по модулю).

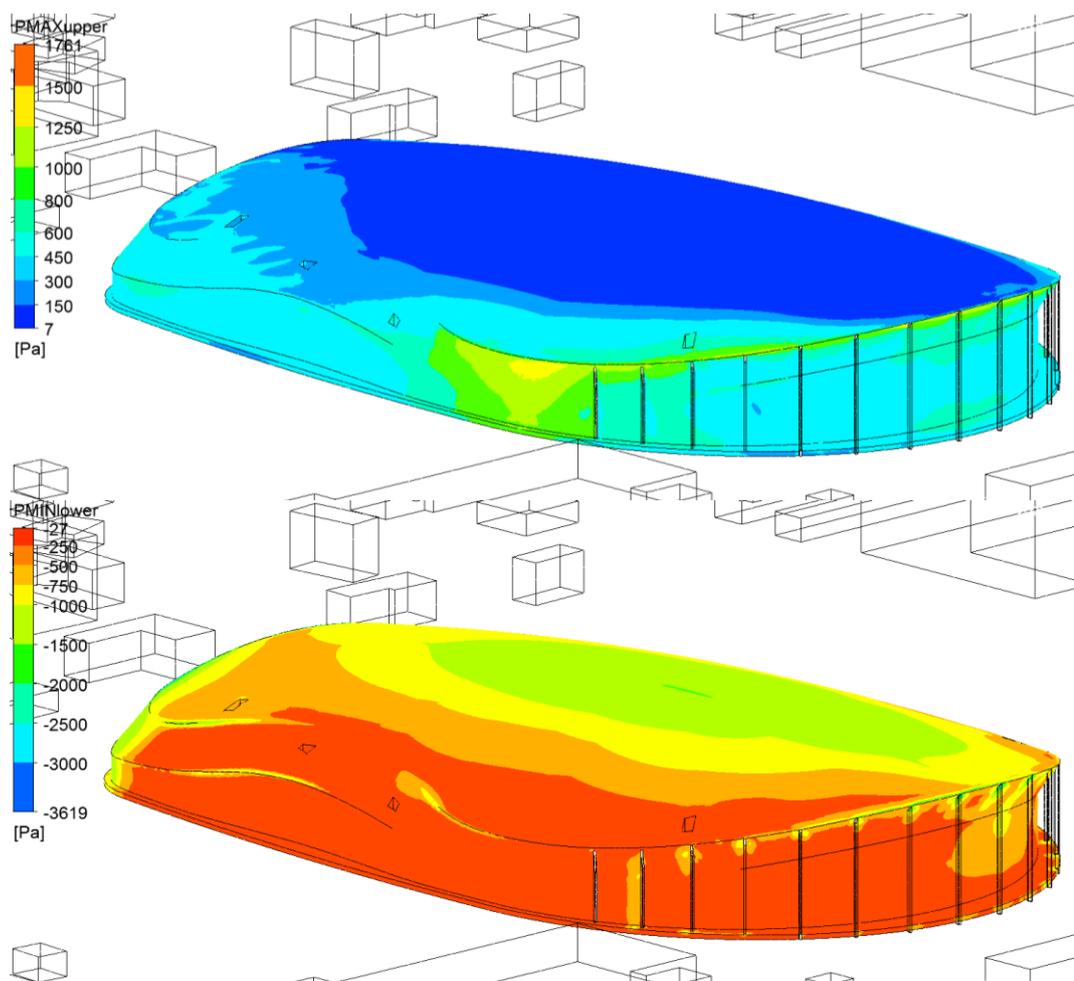


Рис. Верхняя и нижняя огибающие максимальных значений ветрового давления (Па) на ограждающие (фасадные) конструкции.

6. Определение снеговых нагрузок

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:

$S_g = 3.85$ кПа в соответствии с Приложением К к СП [2];

$c_e = 1.0$ в соответствии с п. 10.6 СП [2];

$c_t = 1.0$ в соответствии с п. 10.10 СП [2];

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

Для покрытий *Объекта* необходимо рассмотреть шесть вариантов нагружения (рис. 6.1-6.6) с коэффициентом формы, определяемым в соответствии со схемами Б.1, Б.2, Б.8 Приложения Б к СП [2] и по результатам моделирования, представленным в соответствующем разделе отчета 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.

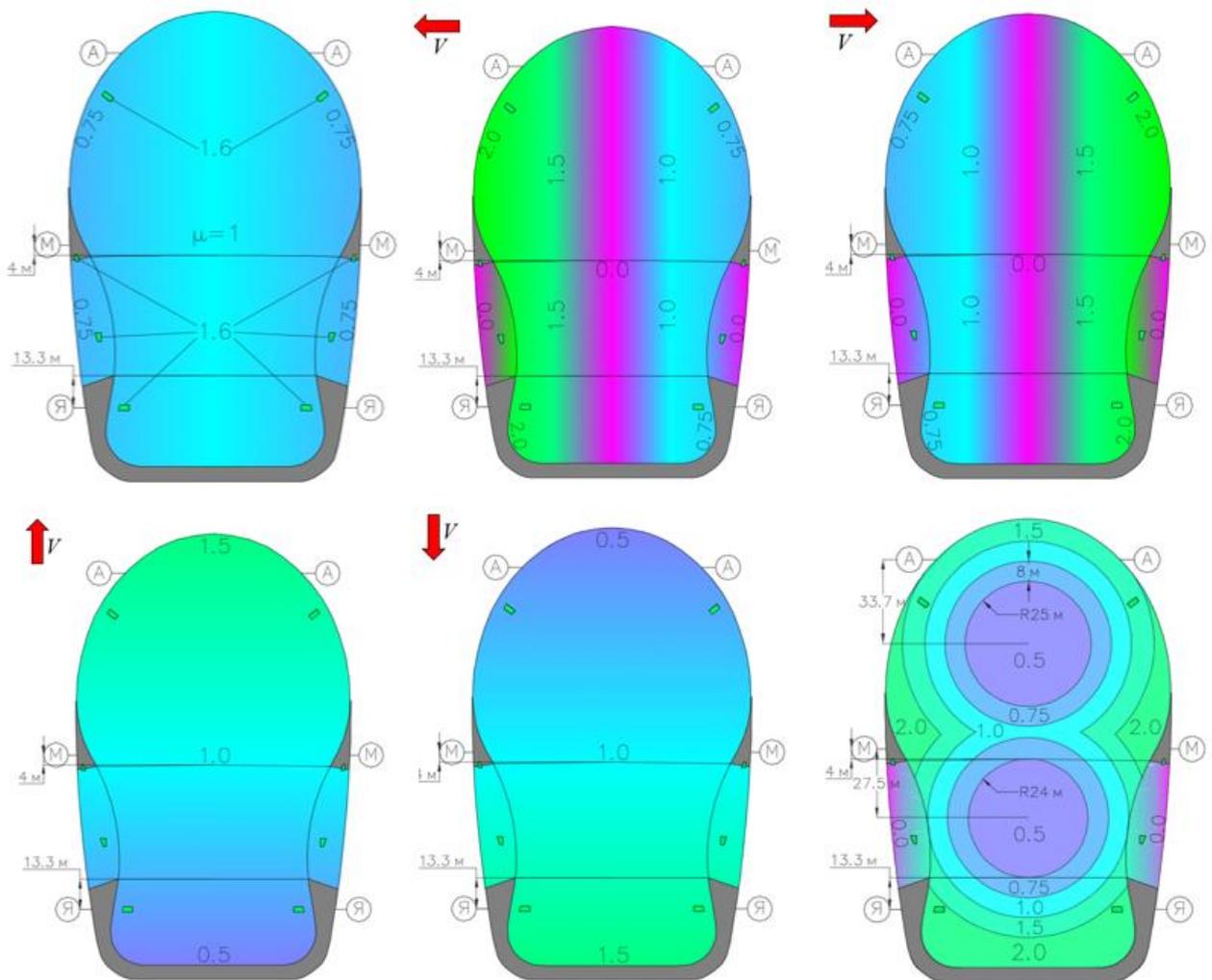


Рис. Различные схемы расчётного коэффициента формы μ для покрытия *Объекта*,

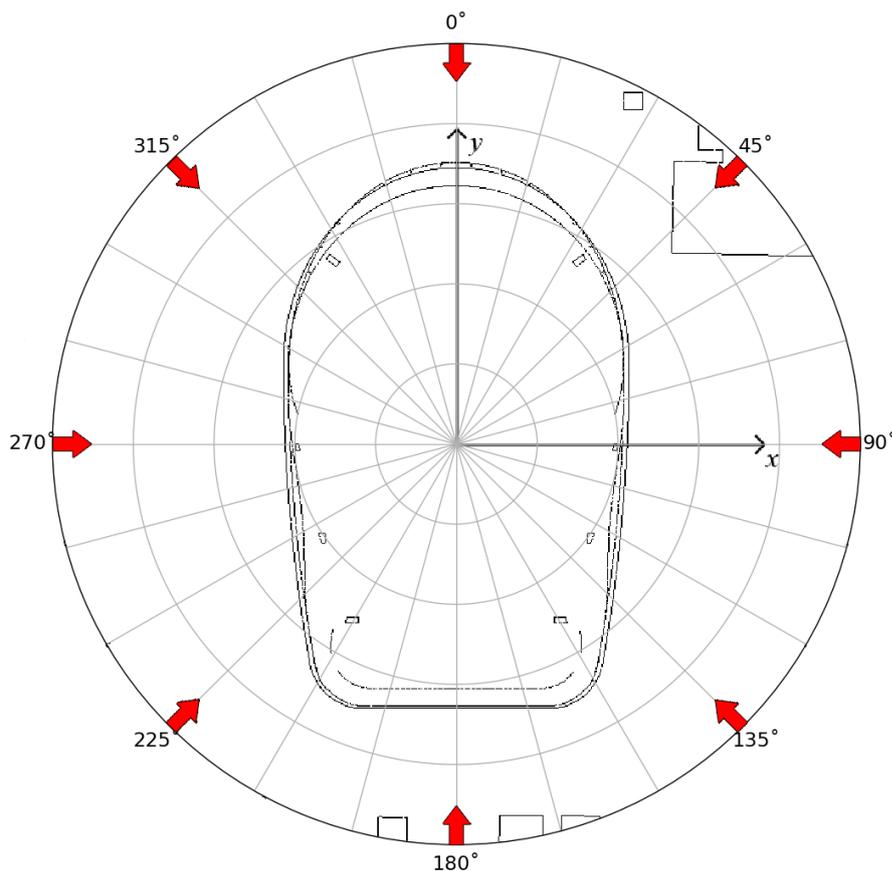
Смоделированные коэффициенты формы для расчетных направлений ветра

С применением численной методики, варьируя скорость ветра, было выполнено по три аэродинамических расчёта для восьми направлений ветра для *Объекта* (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315°) с учётом окружающей застройки. В соответствии с табл. 6.1 СП 131.13330.2020 *Строительная климатология*, средняя скорость ветра на высоте 10 м за зимний период для г. Южно-Сахалинск составляет 2.6 м/с (V_{10}). Расчёты проводились для следующих скоростей:

Табл. 6.1

Номер расчётного случая	Скорость на высоте 10 м, м/с	μ_0
1	1.0	0.7
2	3.0	0.8
3	6.0	0.9

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 выпадения осадков T_+ принято равным 12 ч, а время уноса осадков T_- – 240 ч.

Рис. Расчетные направления ветрового потока покрытий *Объекта*.

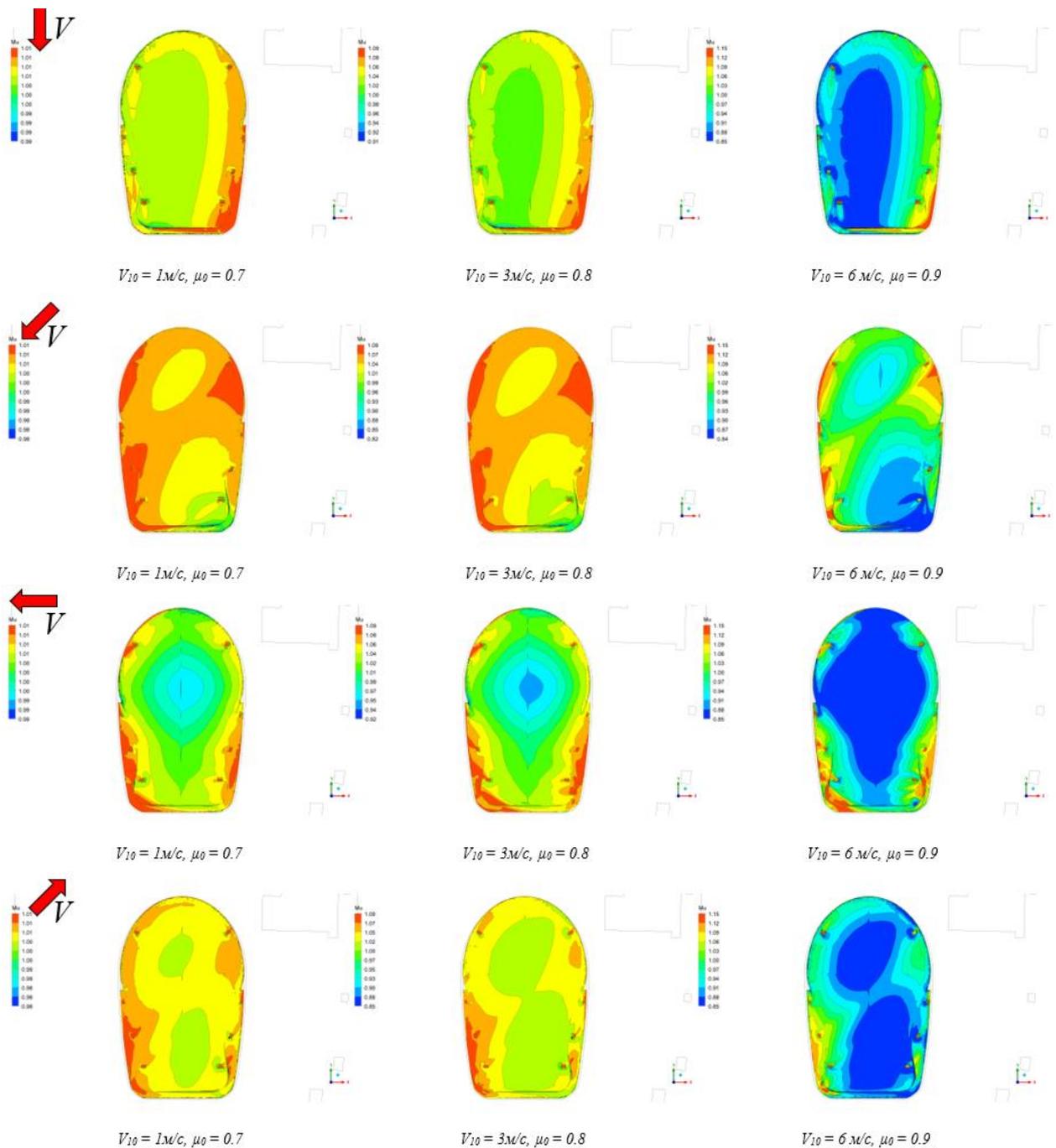


Рис. Различные смоделированные коэффициенты формы μ для направления ветра

7. Выводы и рекомендации

По результатам выполненного комплексного аэродинамического исследования по проектируемому Объекту «Ледовая арена» (г. Южно-Сахалинск) 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 24 расчетных случаев (24 направления ветра с шагом 15° с учетом окружающей застройки) и моделирование снеговых нагрузок также для 24 расчетных случаев (8 направлений ветра и 3 различных скорости ветра).

3. Определены расчетные средние и пульсационные составляющие ветрового давления на несущие конструкции Объекта. Выявлены направления ветра, при которых реализуются максимальные нагрузки.

4. Определены пиковые ветровые давления на ограждающие конструкции Объекта.

В прочностных расчетах ограждающих (фасадных) конструкций рекомендуется использовать значения пиковых ветровых давлений, представленные в отчете о НИР.

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 отчетом о НИР, полученные по схемам Б.1, Б.2, Б.8 Приложения Б к СП и по результатам моделирования, представленным в отчете о НИР.