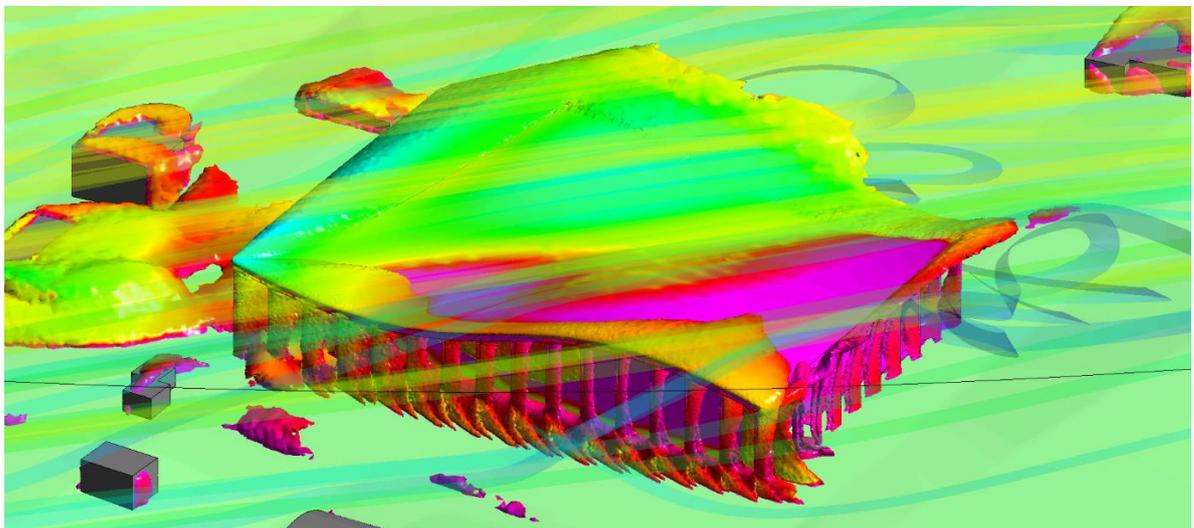
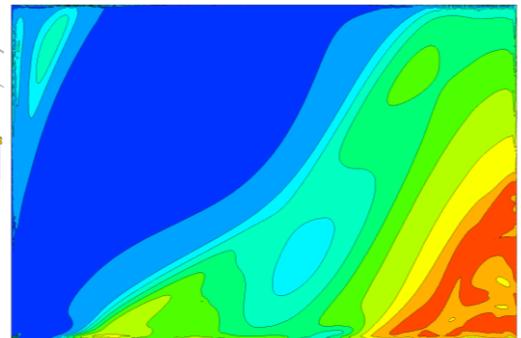
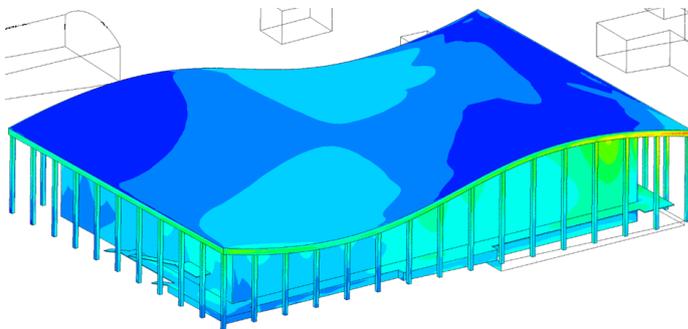
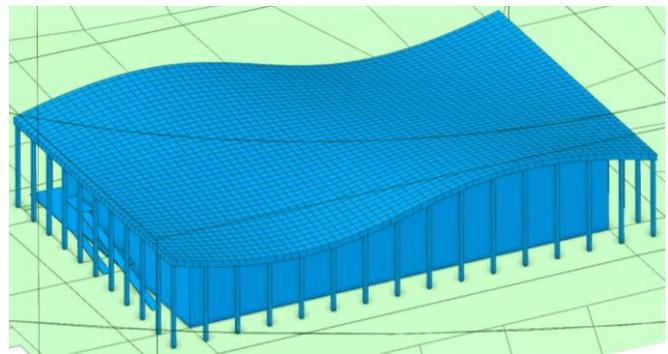
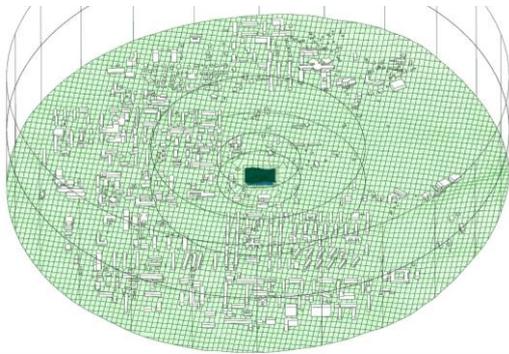


Инв. № САХЗ-2021-11/22-1

Научно-технический отчет

Этап 2

Разработка рекомендаций по назначению ветровых и снеговых нагрузок на проектируемый Центр водных видов спорта в г. Южно-Сахалинск, на основе численного решения трехмерных задач аэродинамики. В рамках проектирования объекта «Центр водных видов спорта»



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 Центра водных видов спорта (далее Объект) расположен в городе Южно-Сахалинск. Территория строительства ограничена с севера и востока территорией Городского парка культуры и отдыха им. Ю.А. Гагарина; с запада – Комсомольской улицей, с юга – территориями Собора Воскресения Христова и теннисного клуба Хоккайдо.

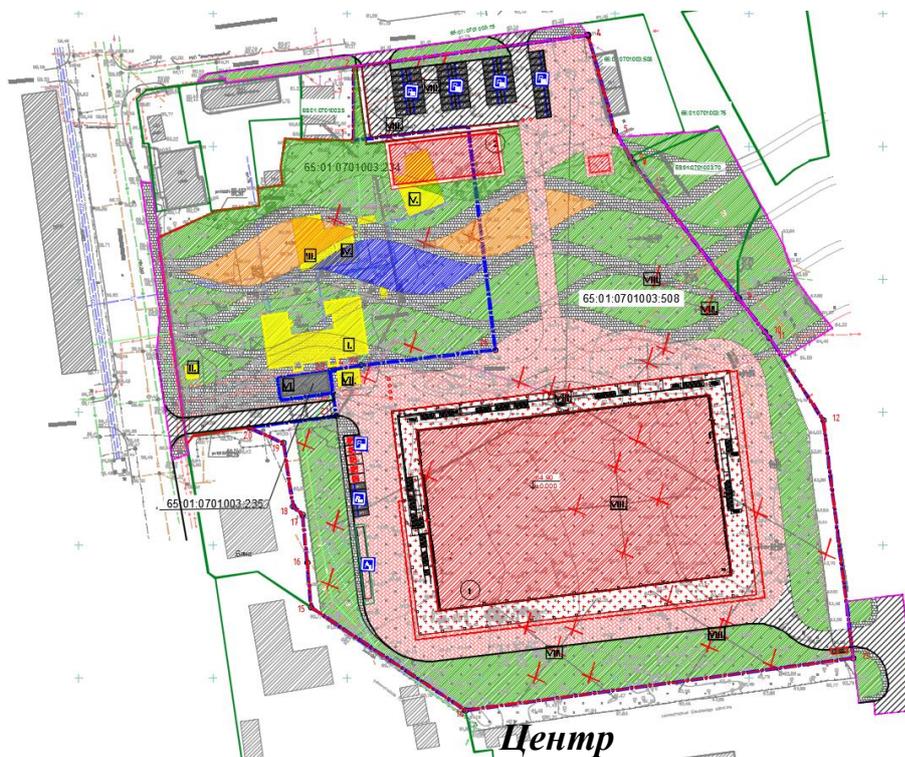


Рис. Схема планировочной организации земельного участка

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 $w_0 = 0.73 \text{ кПа}$, рис. 2.4) 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.

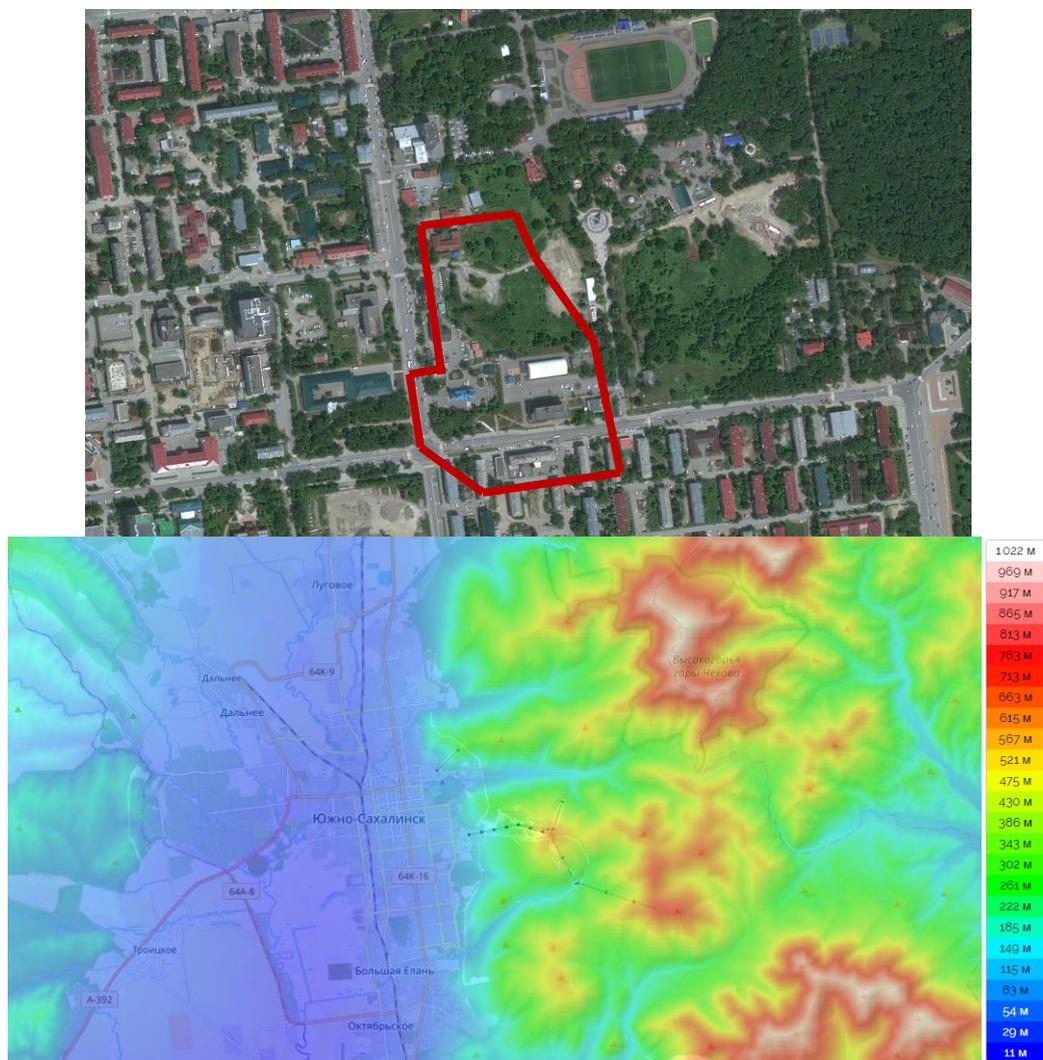


Рис. Карта местности возле площадки строительства и рельеф местности г. Южно-Сахалинск

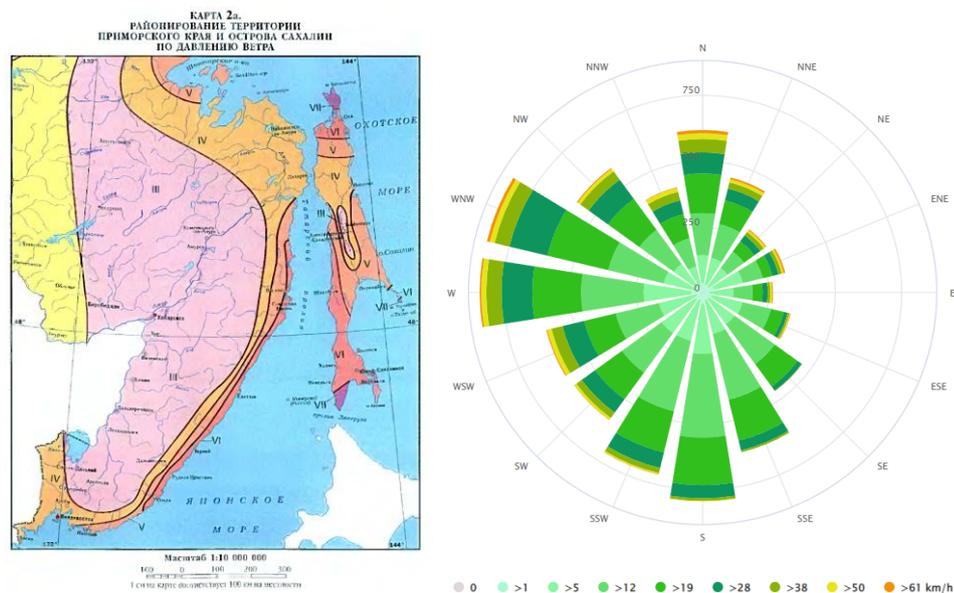


Рис. 1.1 Карта районирования по давлению ветра и роза скоростей ветра для города Южно-Сахалинск,

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.

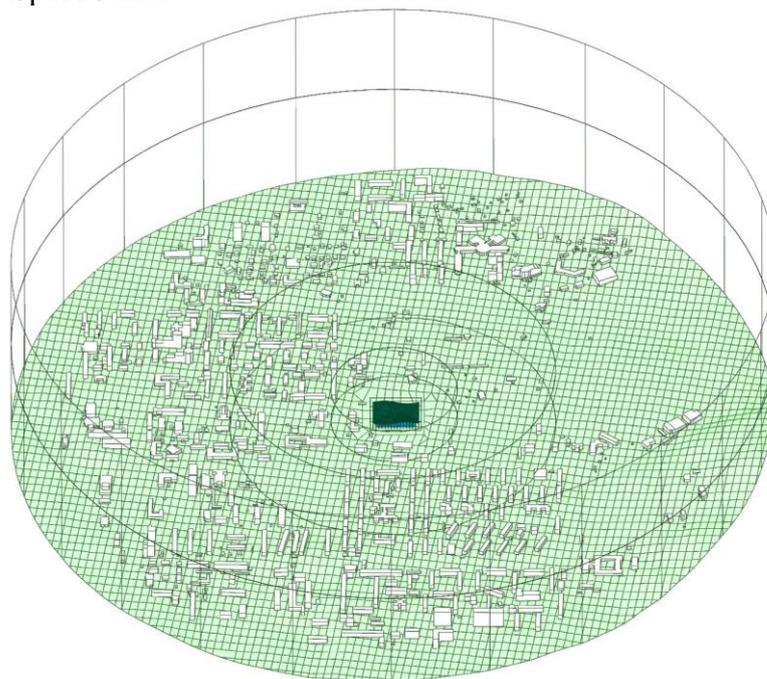


Рис. Модель с учётом застройки. Геометрическая модель. Общий вид Голубым выделен исследуемый объект, белым – неисследуемая застройка.

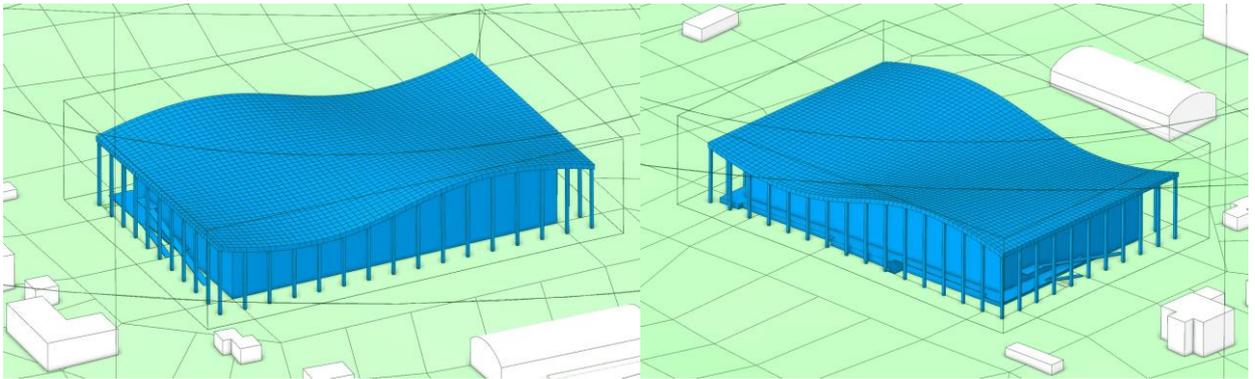


Рис. Модель с учётом застройки. Геометрическая модель. Виды вблизи Центра.

Конечнообъемные сетки

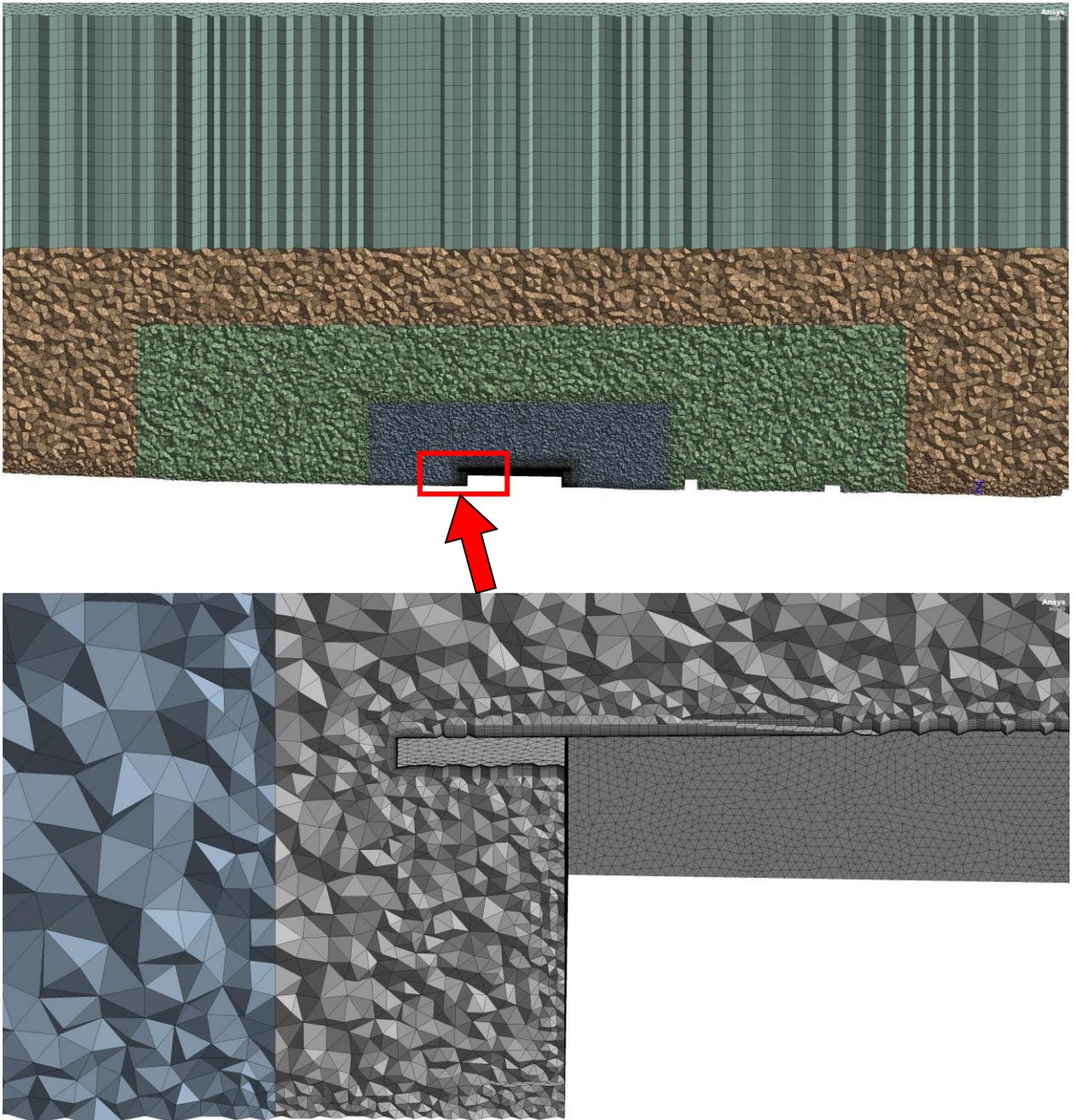


Рис. Модель с учётом застройки. Разрез конечнообъемной сетки

Граничные условия

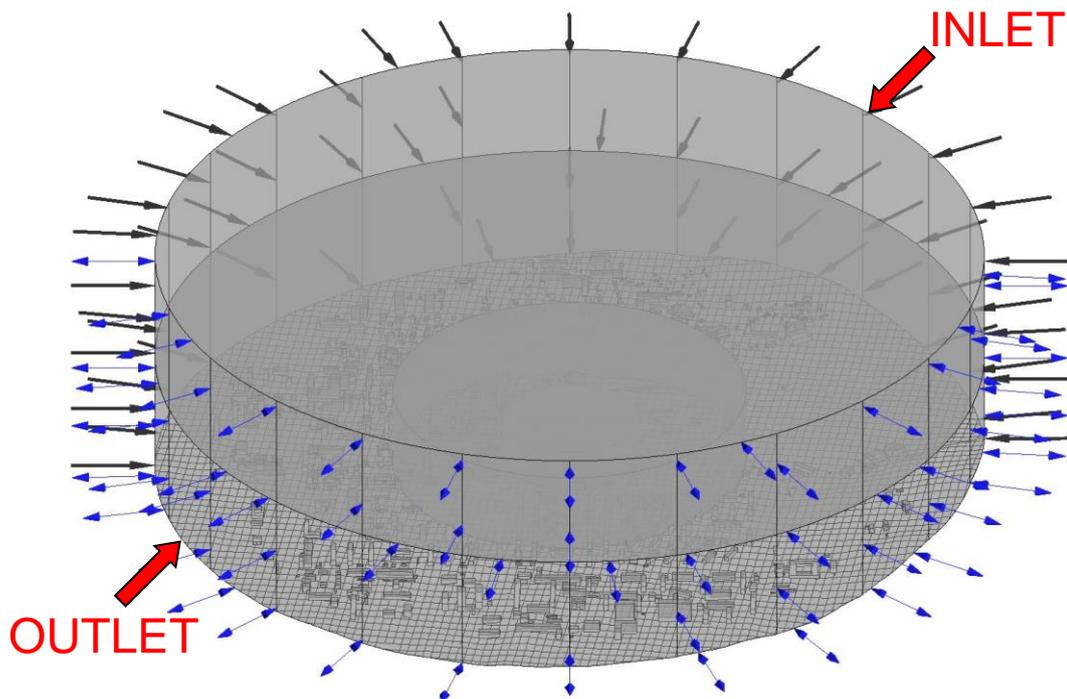


Рис. Расчетная область *Модели с учётом застройки* (ANSYS CFX) с обозначенными граничными условиями. Угол атаки 0°

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 9° по часовой стрелке, ось Y – с Ю на С со сдвигом на 9° по часовой стрелке, ось Z – вверх. Угол атаки ветра (Угол, °) отсчитывается от Севера по часовой стрелке.

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

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 *Центра* 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 Центра 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.

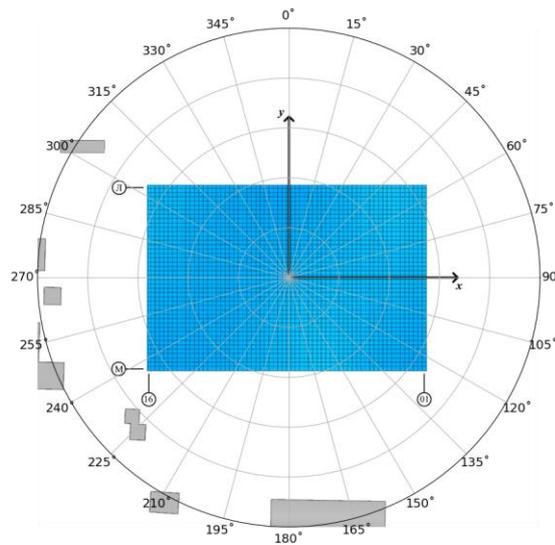


Рис. Система координат и расчетные направления ветрового потока.

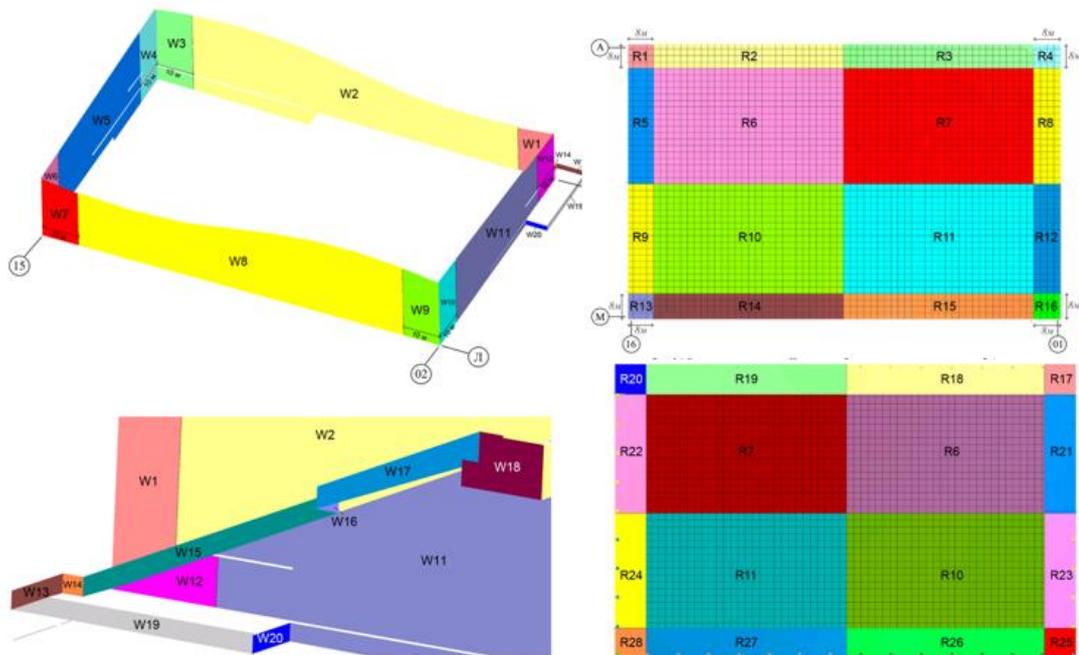


Рис. Схематичная номенклатура компонент стен Центра для сбора аэродинамических нагрузок.

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 вид. 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	10.2	-129.1	129.5
15	-2.3	-107.2	107.2
30	-30.5	-103.8	108.2
45	-76.7	-83.7	113.6
60	-112.1	-70.7	132.5
75	-98.3	-35.5	104.5
90	-64	-0.3	64
105	-60.3	35.2	69.8
120	-45	67.6	81.3
135	-57.3	46.5	73.8
150	-64.1	102.8	121.1
165	-15.3	68.2	69.9
180	16.8	93.9	95.4
195	42.6	122.7	129.9
210	38.6	108.9	115.6
225	105.7	93.8	141.3
240	90.6	109.4	142.1
255	71.8	59.2	93.1
270	90.3	11.7	91
285	117.8	-38.5	123.9
300	84.7	-43.4	95.2
315	41.3	-115.2	122.4
330	42.1	-167.5	172.7
345	15.9	-81	82.5

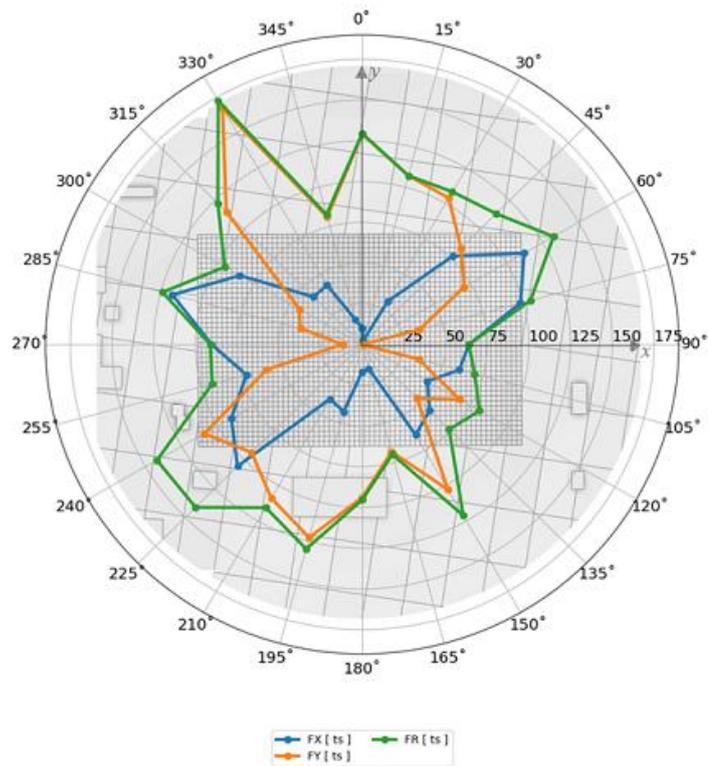


Рис. Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y) и векторная сумма нагрузки (F_R) в зависимости от направления ветра на несущие конструкции *Центра*, тс (значения приведены по модулю)

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

Угол, °	<i>С учётом застройки</i>
	F_z , тс
0	147.5
15	146.8
30	162.7
45	220.9
60	226.9
75	190.1
90	107.1
105	88.9
120	93.3
135	83.3
150	114.1
165	89.5
180	120.1
195	155.2
210	170.5
225	200.0
240	183.7
255	62.8
270	-49.1
285	-21.8
300	-22.5
315	-16.7
330	107.9
345	63.8

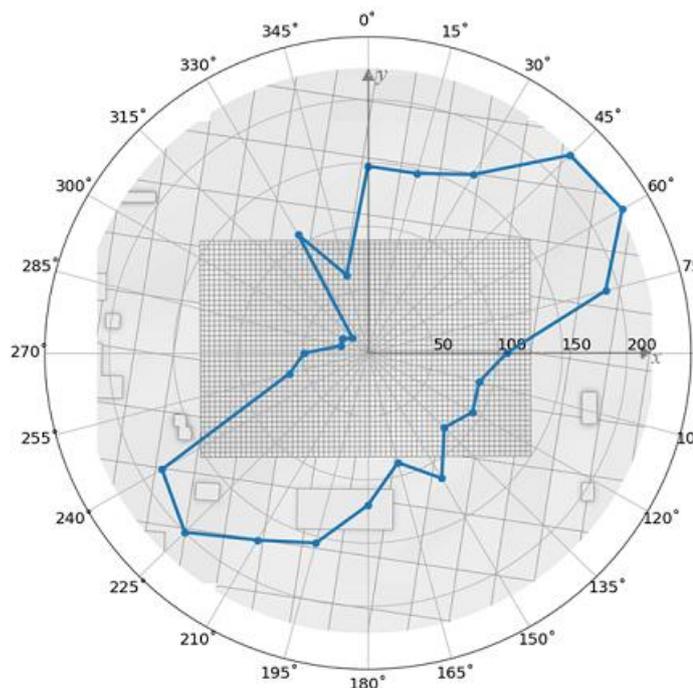


Рис. Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_z) в зависимости от направления ветра на несущие конструкции Центра, тс (значения приведены по модулю)

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° . *Пример представления результатов для части компонент

Комп.	P	P_{puls}	P_{sum}	Комп.	P	P_{puls}	P_{sum}
R1	-495.7	745.4	-1241.1	R17	19.4	252	271.4
R2	-584.9	586.5	-1171.4	R18	485.3	383.9	869.2
R3	-360.3	585.5	-945.8	R19	349.9	293.8	643.7
R4	-114.3	285.1	-399.5	R20	0.6	181.8	182.3
R5	-152	275.2	-427.2	R21	-75.8	78.9	-154.7
R6	-241.9	336.3	-578.2	R22	-123.3	100.3	-223.6
R7	-72.4	185.2	-257.7	R23	-73.6	90.7	-164.4
R8	-48.6	131.9	-180.5	R24	-92.4	87.8	-180.2
R9	-35.2	148.6	-183.9	R25	60.9	70.8	131.7
R10	-48.9	115.6	-164.5	R26	25.4	33.4	58.9
R11	-41.4	114.1	-155.6	R27	-79.8	58	-137.8
R12	-38.5	108.2	-146.7	R28	-84.6	72.7	-157.3
R13	56.6	138	194.6	W1	259.2	275.9	535.1
R14	-19.3	73.2	-92.5	W2	450	277.6	727.6
R15	-81.7	155.3	-237	W3	236.5	223.1	459.6
R16	-71.2	138.9	-210.1	W4	-56.9	53.4	-110.3

Пиковые ветровые нагрузки на ограждающие конструкции

На рис. и в табл. показаны огибающие максимального и минимального значений ветрового давления на ограждающие (фасадные) конструкции *Центра водных видов спорта* 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 Центра.

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 *Центра*

Угол, °	С учётом застройки	
	R _{МИН} , Па	R _{МАХ} , Па
0	-3045	1392
15	-2512	1142
30	-2464	1200
45	-3257	1116
60	-3899	1357
75	-3429	1351
90	-2405	1259
105	-2402	1021
120	-2063	1018
135	-2193	1119
150	-3417	1692
165	-2619	1163
180	-3717	1546
195	-4012	1887
210	-3978	1741
225	-6003	2228
240	-5186	1804
255	-2232	1550
270	-3689	2307
285	-3627	1798
300	-3100	2083
315	-2656	1553
330	-4391	2200
345	-3728	1538

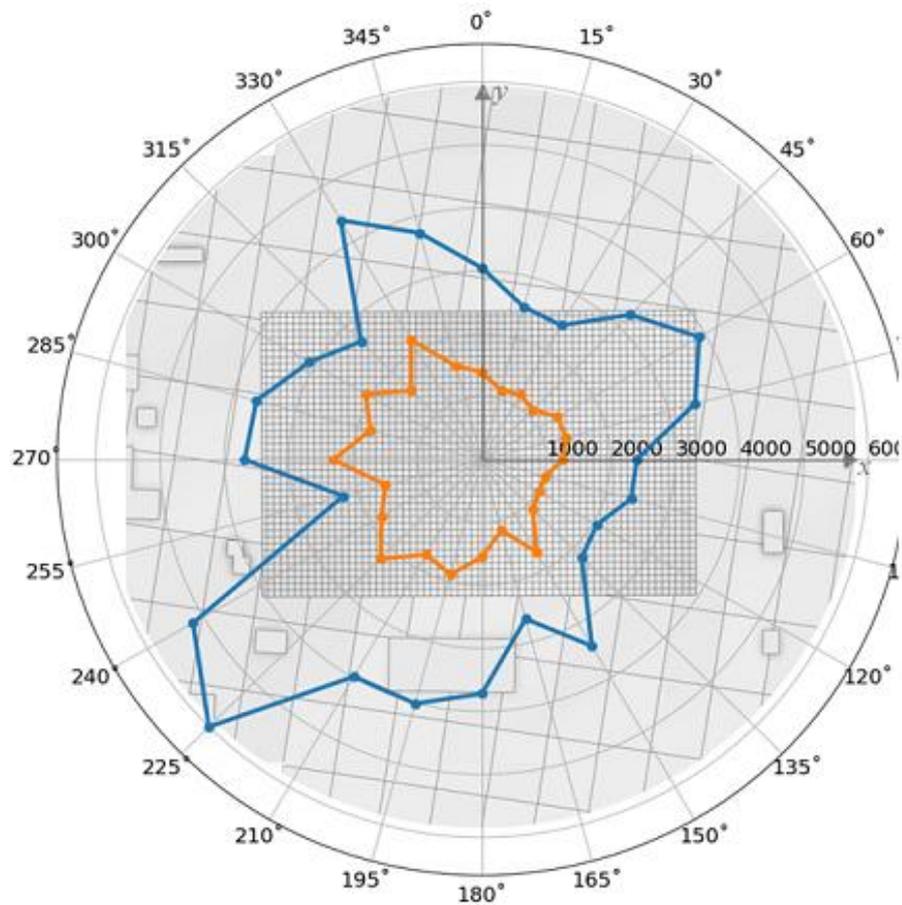


Рис. Огибающие максимального (оранжевая линия) и минимального (синяя линия) пиковых значений давления на ограждающие (фасадные) конструкции Центра в зависимости от направления ветра, Па (значения приведены по модулю).

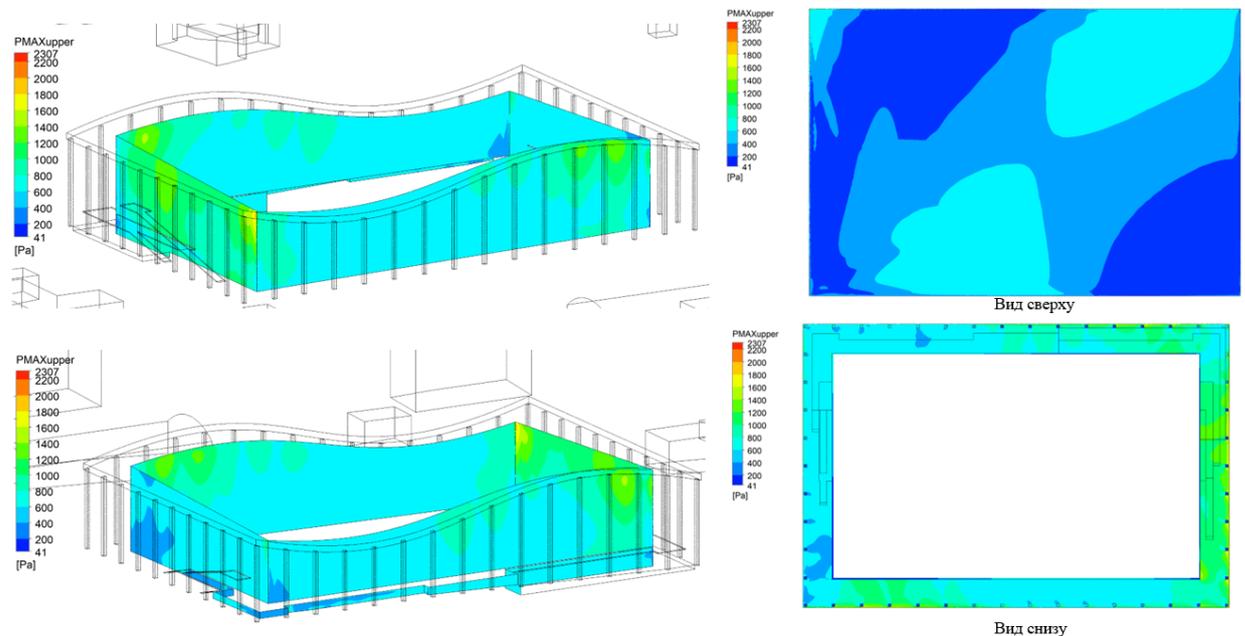


Рис. Верхняя огибающая минимальных значений ветрового давления (Па) на ограждающие (фасадные) конструкции.

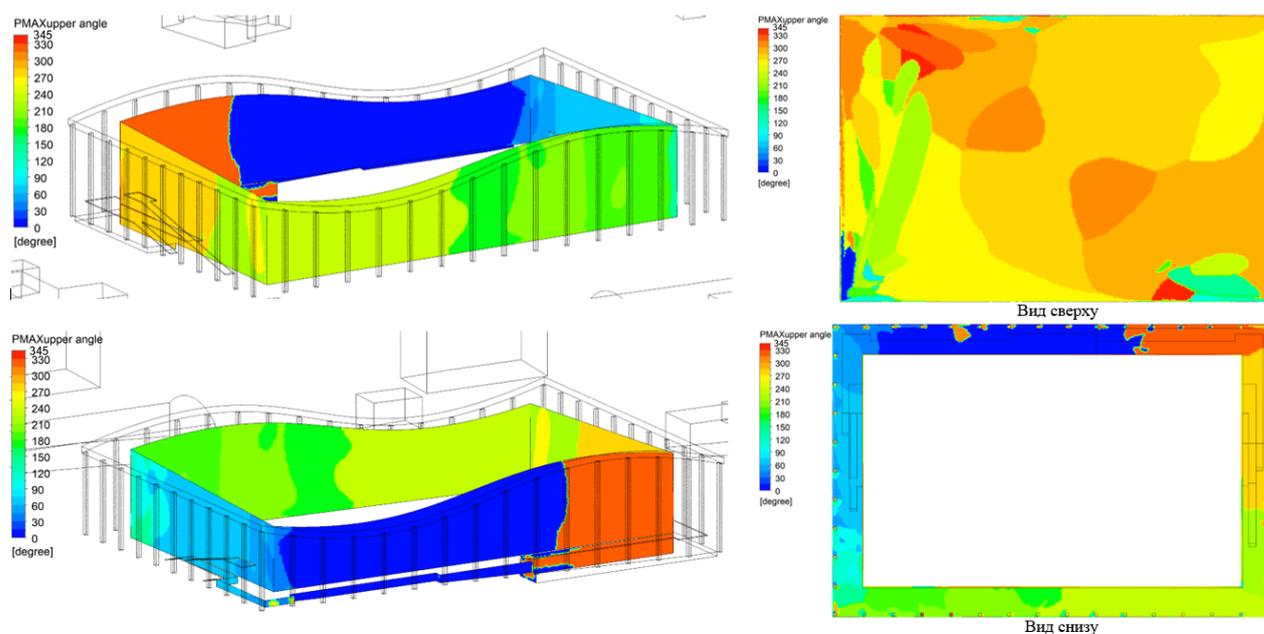


Рис. Углы атаки ветра ($^{\circ}$), при которых реализуется верхняя огибающая максимальных значений ветрового давления на ограждающие (фасадные) конструкции

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 Центра, 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;

$c_e = 1.0$ 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 Центра необходимо рассмотреть семь вариантов нагружения с коэффициентом формы, определяемым в соответствии со схемами Б.1, Б.2 и Б.10 Приложения Б к СП и по результатам 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.

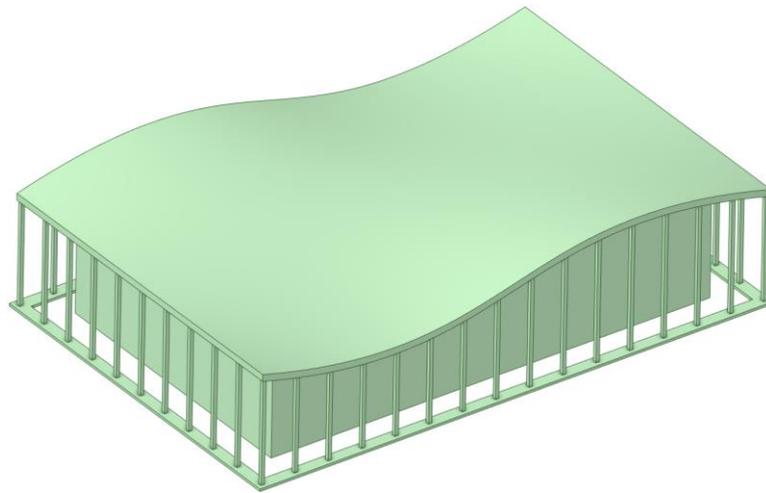


Рис. Геометрическая модель Центра, изометрия

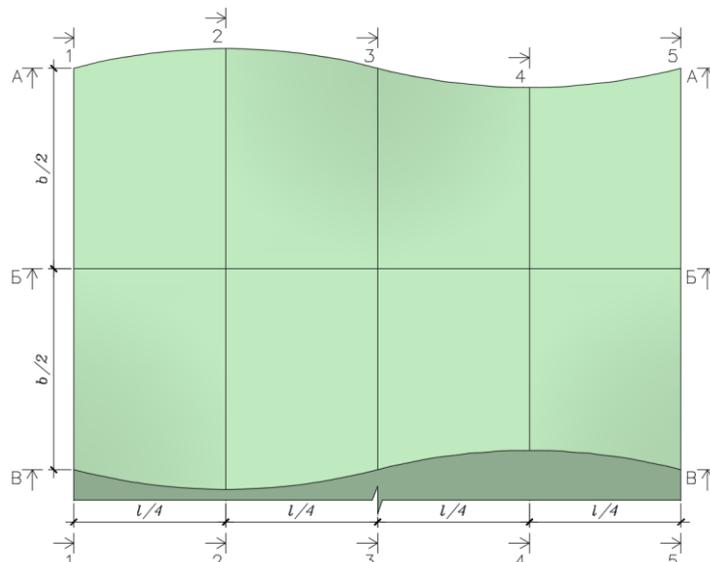


Рис. Схема сечений для эпюр коэффициента формы μ для кровли Центра (l – длина Центра, b – ширина Центра)

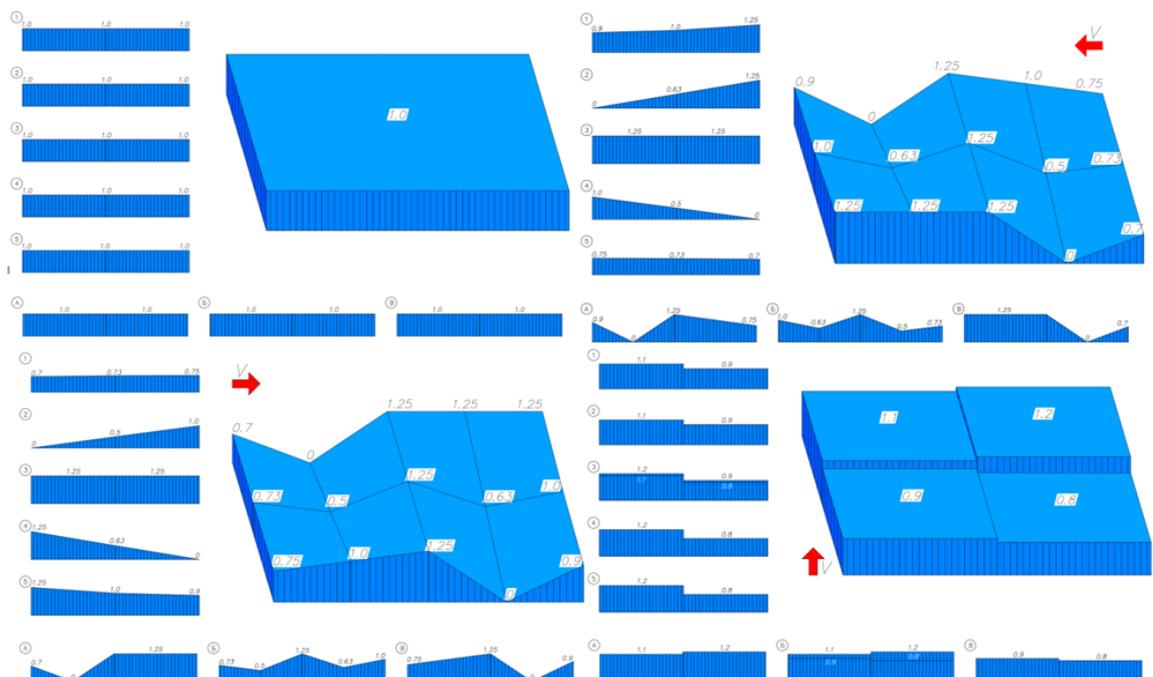


Рис. Различные схемы расчётного коэффициента формы μ для покрытия Центра

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 *Центра* (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	0.5
2	3.0	0.5
3	6.0	1.0

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.

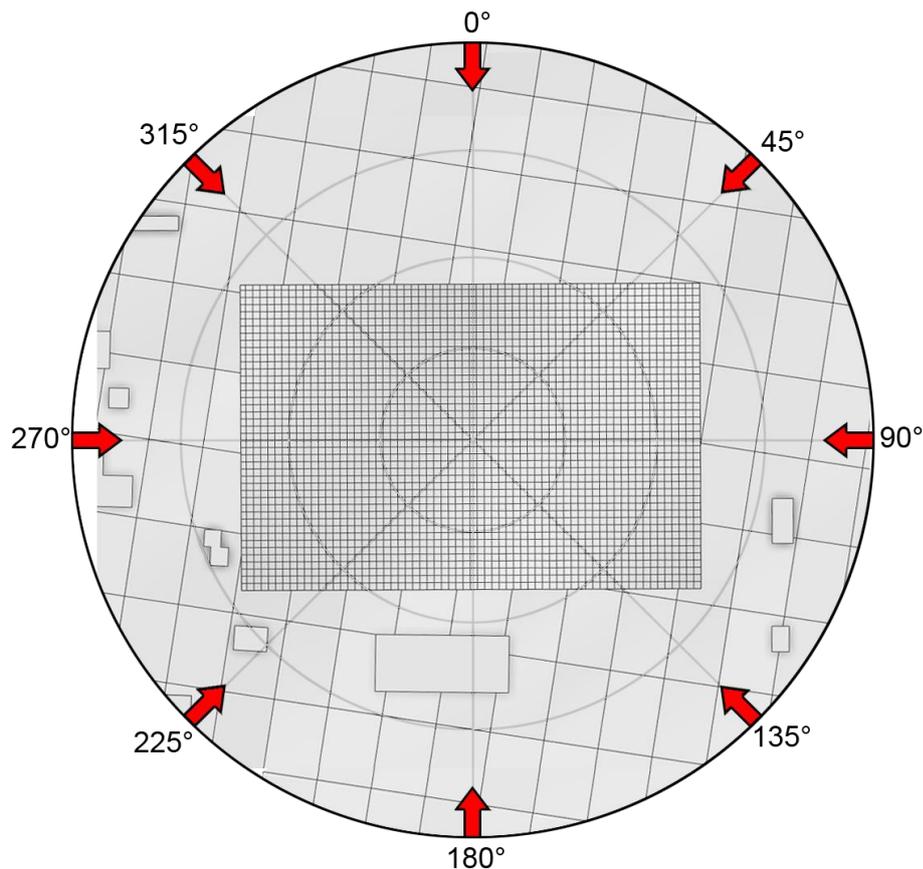


Рис. Расчетные направления ветрового потока покрытий *Центра*.

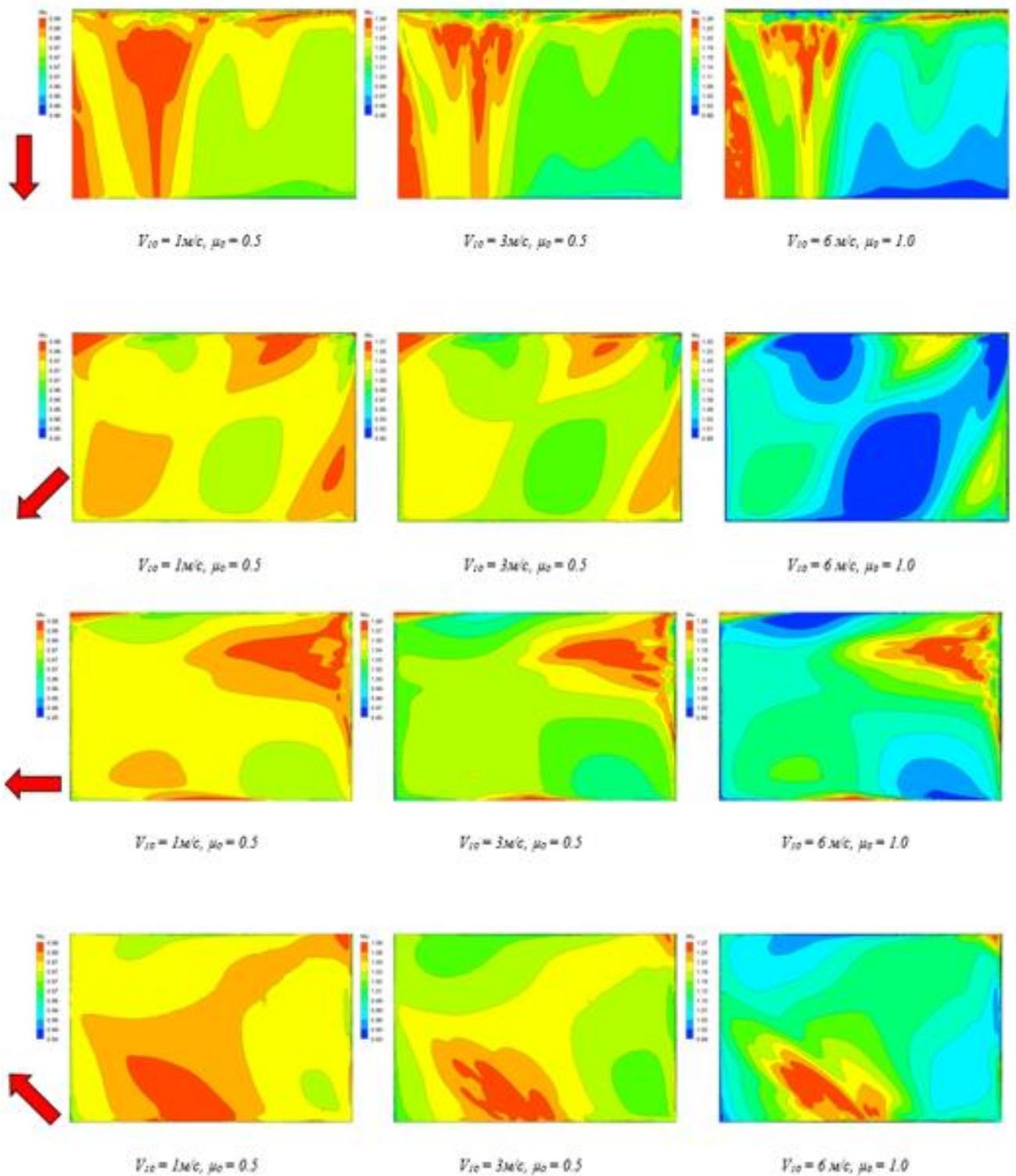


Рис. Смоделированные коэффициенты формы μ для различных направлений ветра

7. Выводы и рекомендации

По результатам выполненного комплексного аэродинамического исследования по проектируемому Объекту «Центр водных видов спорта» (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. Определены максимальные ветровые нагрузки и направления ветра, при которых они реализуются.

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 рис. настоящего отчёта, полученные по схемам Б.1, Б.2 и Б.10 Приложения Б к СП и по результатам моделирования, представленным в отчете о НИР.