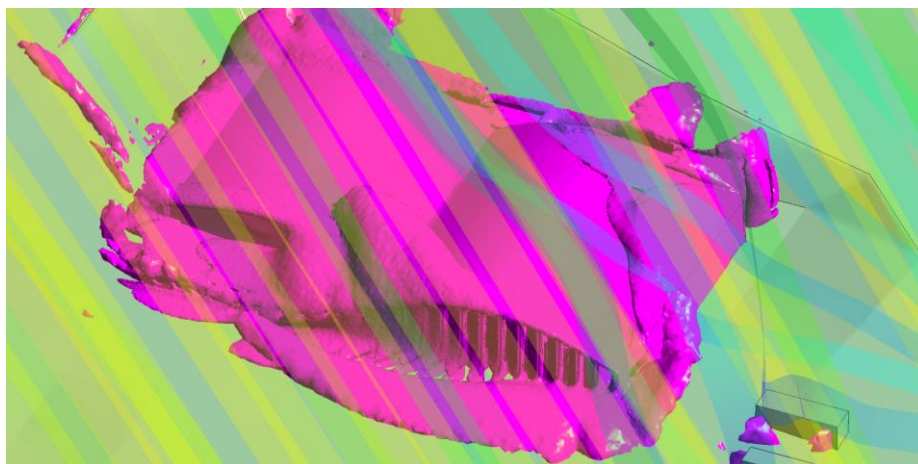
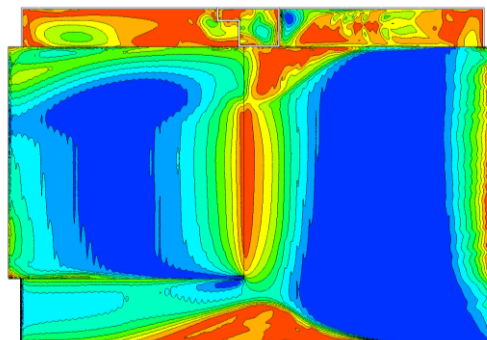
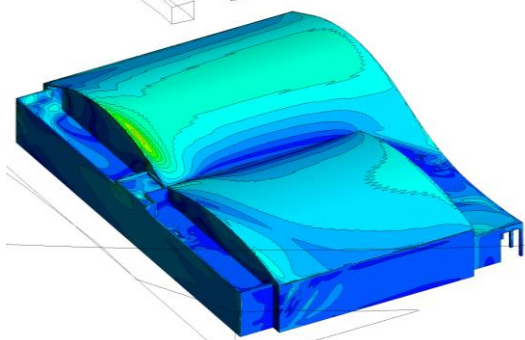
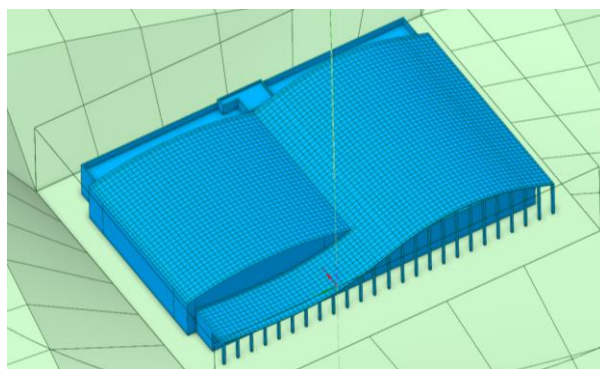
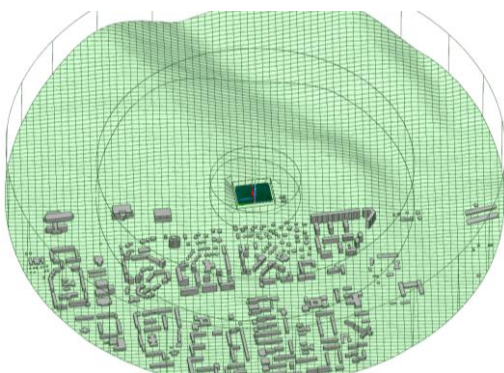


Инв. № САХ3-2021-11/22-2

Научно-технический отчет

Этап 1

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



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 Универсального спортивного комплекса (далее Объект) расположен в городе Южно-Сахалинск. Территория строительства ограничена с севера, востока и юга лесом; с запада – улицей Горького.

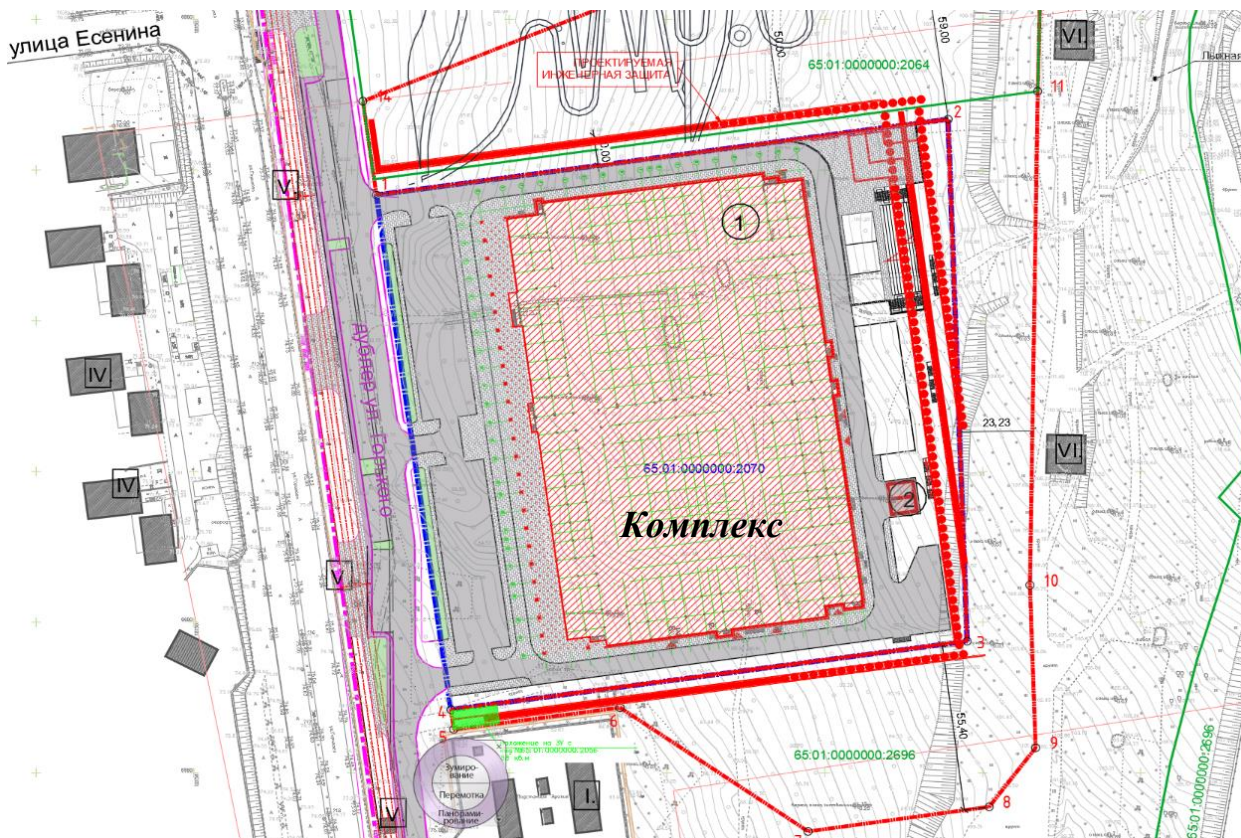


Рис. Схема планировочной организации земельного участка

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 низменные 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 (<https://maps.yandex.ru/>)

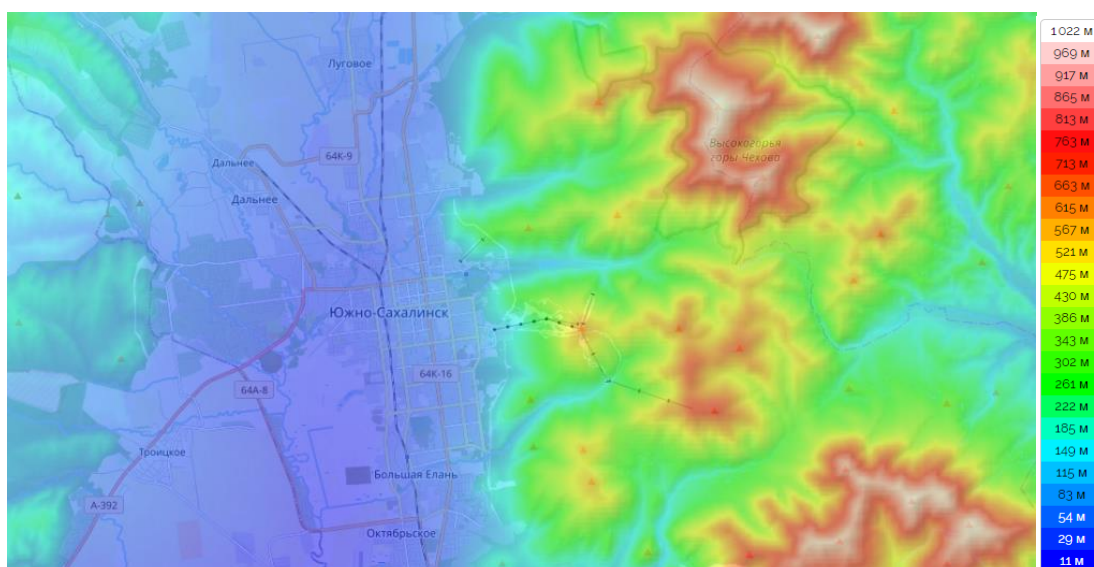


Рис. Рельеф местности г. Южно-Сахалинск (ru-ru.topographic-map.com)

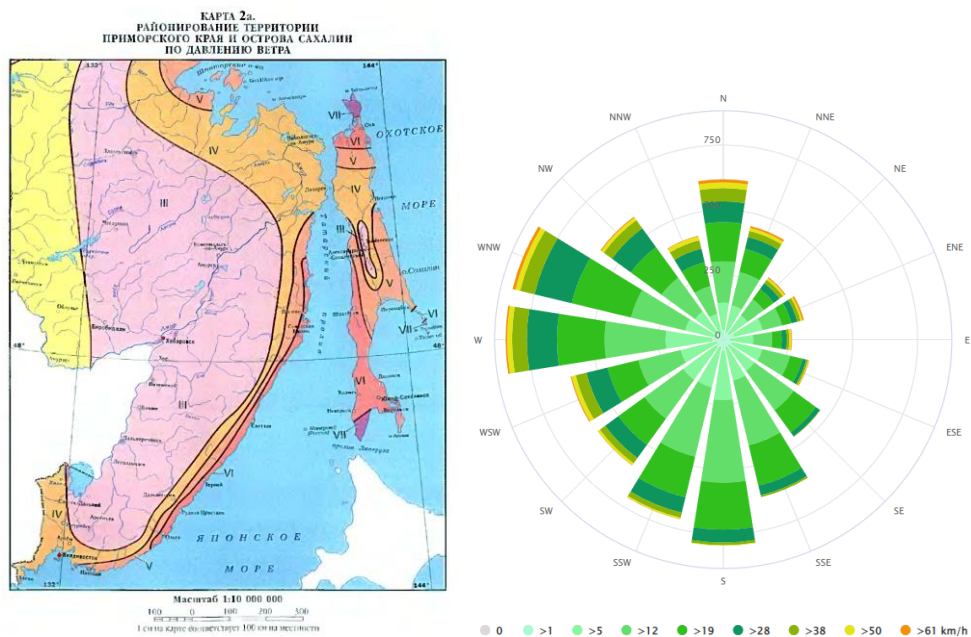


Рис. Карта районирования по давлению ветра и роза скоростей ветра для города Южно-Сахалинск

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.

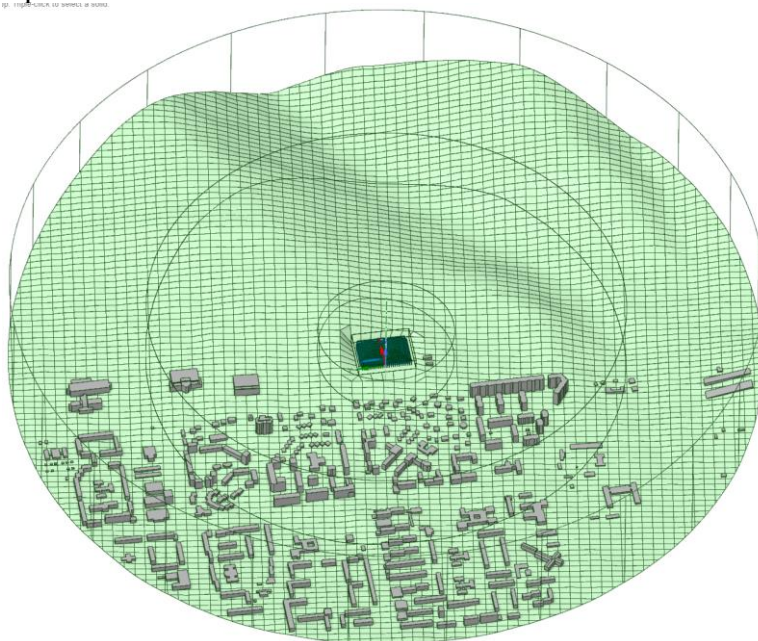


Рис. Модель с учётом застройки. Геометрическая модель. Общий вид

Голубым выделен исследуемый объект, белым – неисследуемая застройка.

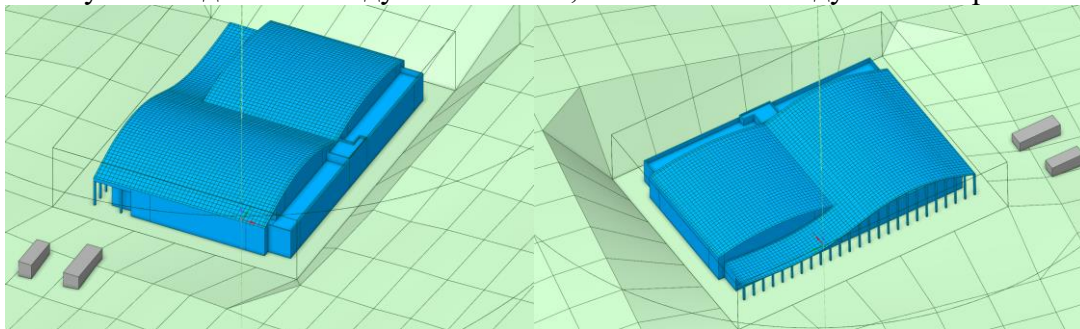


Рис. Модель с учётом застройки. Геометрическая модель. Виды вблизи Объекта

Конечнообъемные сетки

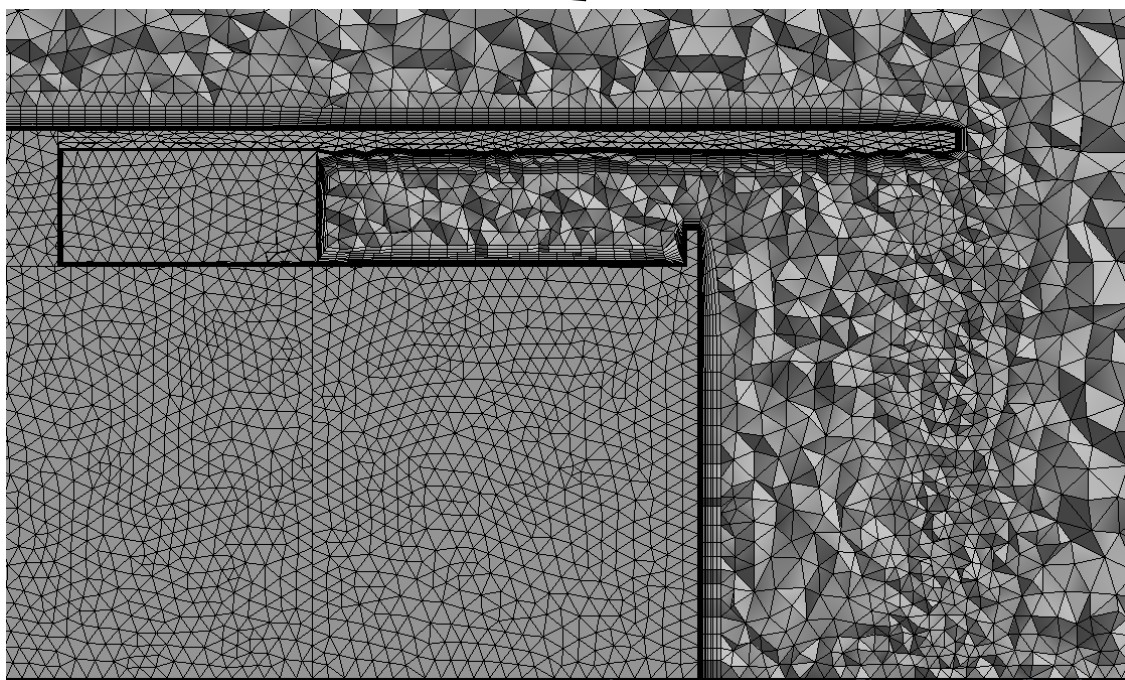
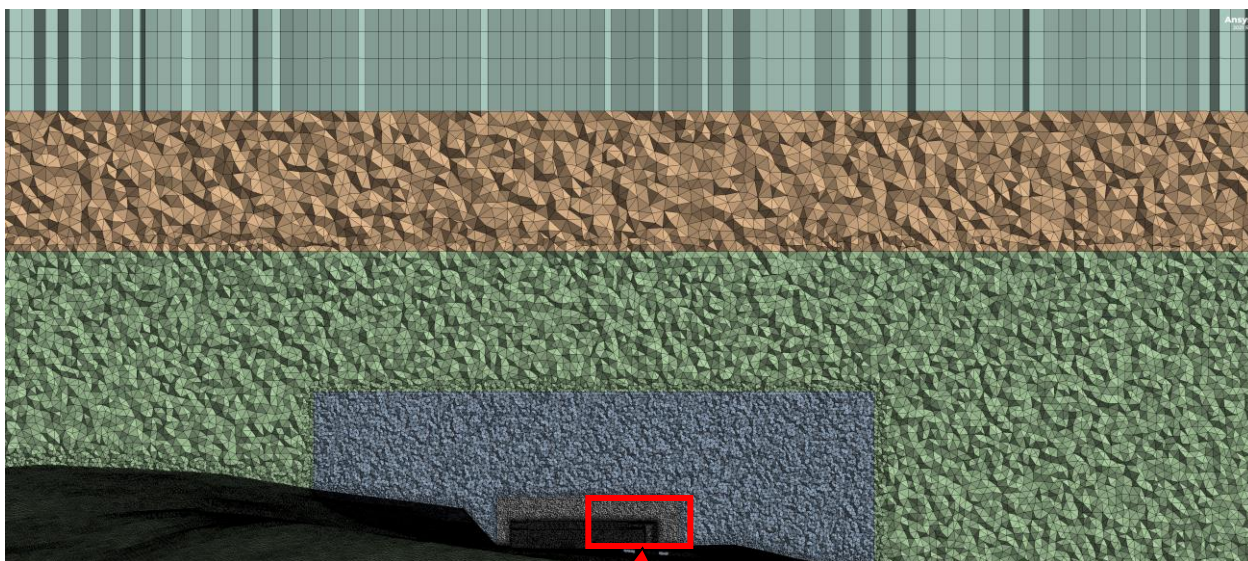


Рис. Модель с учётом застройки. Разрез конечнообъемной сетки

Граничные условия

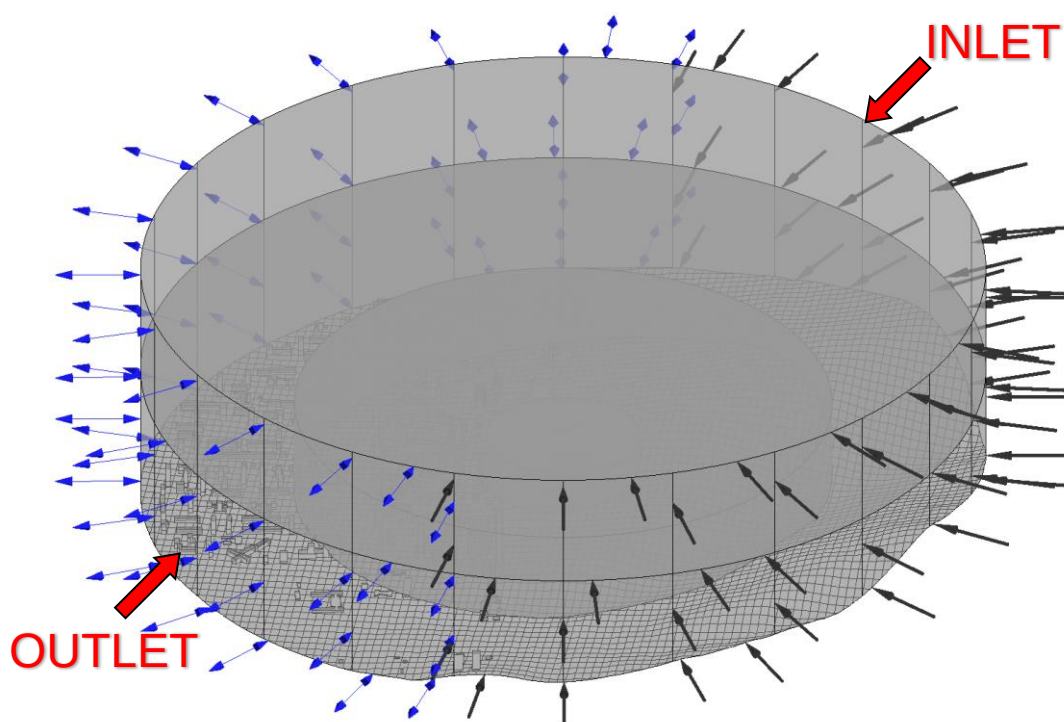


Рис. Расчетная область *Модели с учётом застройки* (ANSYS CFX) с обозначенными граничными условиями. Угол атаки 105°

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 7.8° против часовой стрелки, ось Y – с Ю на С со сдвигом на 7.8° против часовой стрелки, ось Z – вверх. Угол атаки ветра (Угол, °) отсчитывается от Севера по часовой стрелке.

Схемы нумерации поверхностей сбора аэродинамических нагрузок (далее компоненты) приведены на рис. 5.2–5.8. 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 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.

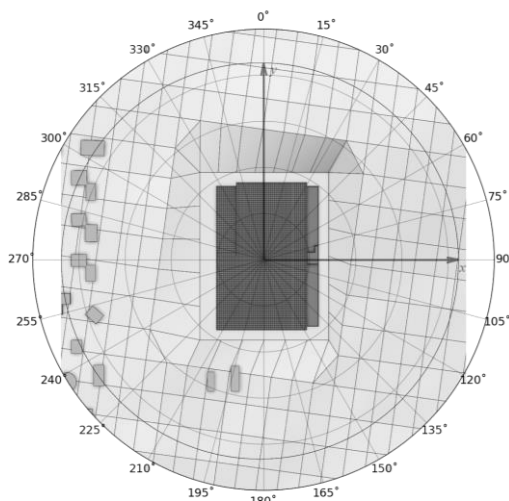


Рис. Система координат и расчетные направления ветрового потока.

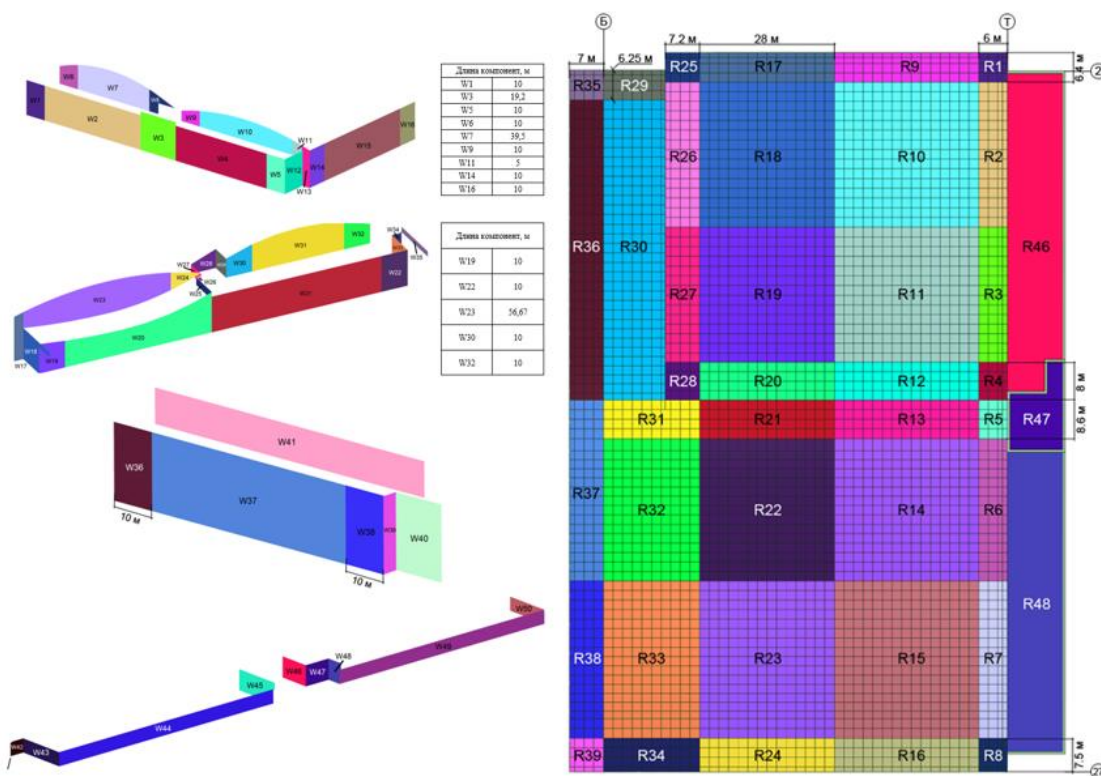


Рис. Схематичное изображение номенклатуры компонент стен и покрытия Объекта для сбора аэродинамических нагрузок.

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 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	65.8	-126.8	142.9
15	19.4	-29.2	35.1
30	-18.5	-34.3	39
45	-20.5	-25.9	33
60	2.2	0.8	2.4
75	-48.9	-9.6	49.9
90	-40.9	13.1	42.9
105	-16.7	22.6	28.1
120	-4.4	19.8	20.3
135	-71.9	73.3	102.6
150	-72	71.9	101.8
165	-42.9	57.5	71.7
180	-22.6	61.9	65.9
195	3.8	60.9	61
210	-38	100.5	107.4
225	56.4	54	78.1
240	93.1	30.7	98.1
255	125.2	-33.1	129.5
270	158.4	-53.8	167.2
285	208.1	-81.4	223.5
300	254.4	-121.1	281.8
315	150.3	-140.8	205.9
330	107	-119.6	160.5
345	74.9	-137.4	156.5

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

Угол, °	С учётом застройки
	F_Z , тс
0	308.9
15	123.4
30	75.6
45	91
60	152.5
75	154.5
90	245.8
105	318.2
120	311
135	491.8
150	432.3
165	369.9
180	326.7
195	103
210	-200.6
225	-354.8
240	-379.7
255	-268.9
270	-134.4
285	69.6
300	249.2
315	320.8
330	354
345	361.2

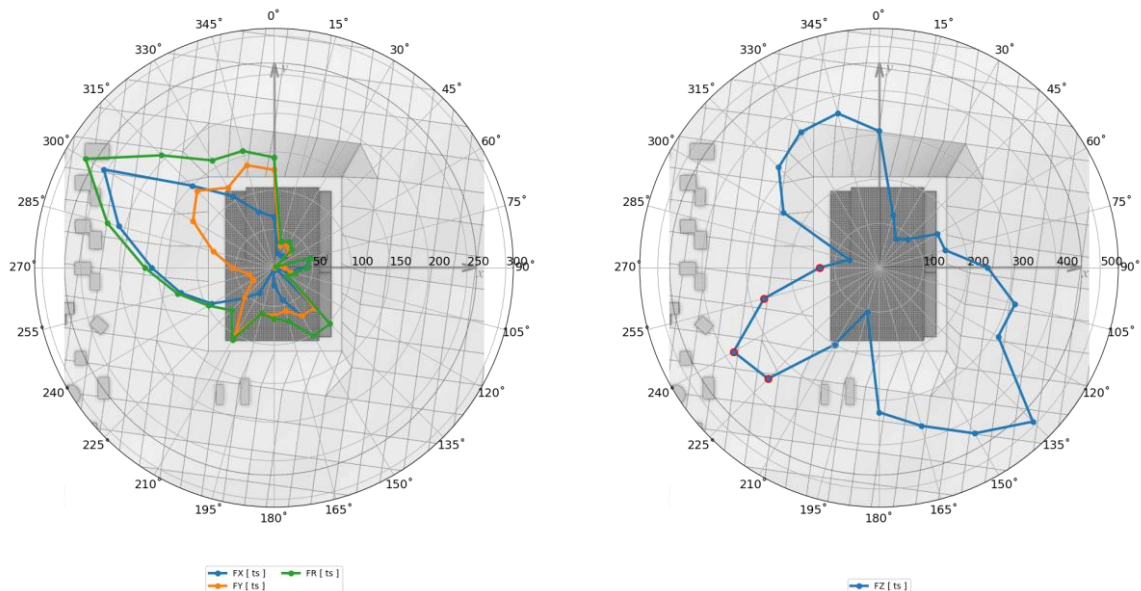


Рис. 5.1 Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_X , F_Y) и векторная сумма нагрузки (F_R) (слева) и (F_Z) (справа) в зависимости от направления ветра на несущие конструкции *Объекта*, тс

Таблица. Составляющие ветрового давления (P – средняя, P_{puls} – пульсационная, P_{sum} – суммарная, Па) для соответствующей компоненты. Объект с учётом окружающей застройки. Угол атаки ветра 135° .

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	-428.1	247.5	-675.6	R27	-358.3	264.3	-622.5	W1	-193.1	154.9	-348.1	W26	-416.8	6.7	-423.5
R2	-401.9	247.9	-649.7	R28	-189.3	172.7	-362	W2	-148.2	138.8	-287	W27	-416.9	7	-423.9
R3	-280.3	162.6	-442.9	R29	-385.9	209.6	-595.6	W3	-282.9	199.9	-482.8	W28	-416.9	3.2	-420.1
R4	-361.1	240	-601.1	R30	-391.7	119.1	-510.8	W4	-248.7	165.8	-414.6	W29	-416.9	6.1	-423
R5	-497.9	281	-779	R31	-266.7	195.1	-461.8	W5	-251.4	151.6	-403	W30	-412.8	55.3	-468.1
R6	-885.5	515.4	-1401	R32	-513.5	319	-832.6	W6	-14.8	130.7	-145.5	W31	-405.4	50.2	-455.5
R7	-314.4	244.9	-559.4	R33	-451	299.8	-750.8	W7	-69	121.1	-190.1	W32	-394.2	24.5	-418.7
R8	-223.7	187	-410.6	R34	-228.7	199.9	-428.6	W8	-169.8	182.8	-352.6	W33	-242.2	202.2	-444.5
R9	-292.2	166.4	-458.7	R35	-260.4	163.3	-423.7	W9	-326.4	71.4	-397.9	W34	-323	163.9	-486.9
R10	-345.1	207.6	-552.7	R36	-399.9	158.6	-558.5	W10	-177.7	118	-295.7	W35	17	185.1	202.1
R11	-290.8	221.5	-512.3	R37	-463.9	291	-755	W11	-126.2	92.7	-218.9	W36	-71.4	131	-202.4
R12	-81.8	136.2	-218	R38	-457.3	304.7	-762	W12	-307.2	65.8	-373	W37	173.8	143.7	317.5
R13	-131.4	142.8	-274.2	R39	-331.2	253.4	-584.6	W13	-307.4	57.8	-365.1	W38	337.4	181.8	519.3
R14	-486.3	322.6	-808.9	R40	-253.1	85.4	-338.6	W14	-298.2	94.5	-392.7	W39	416.6	151.3	567.9
R15	-366.8	262.1	-629	R41	-351.1	117.4	-468.5	W15	-207.7	81.2	-288.9	W40	377.1	157	534.2
R16	-229.4	204.8	-434.2	R42	-408.8	79.5	-488.3	W16	-181.6	75.6	-257.2	W41	-389.5	80.6	-470.1
R17	-269.4	186.3	-455.7	R43	-405.9	66.8	-472.7	W17	-282.7	119.6	-402.3	W42	-404.9	119.3	-524.2
R18	-363.3	251.8	-615.1	R44	-404.3	89.3	-493.7	W18	-191.2	98.1	-289.3	W43	-307.7	223.2	-530.8
R19	-295.5	232.4	-527.9	R45	-389.8	75.1	-464.9	W19	-281.7	54.2	-335.9	W44	-119.6	95.6	-215.2
R20	-41.8	95	-136.8	R46	-188.8	66.4	-255.2	W20	-343.5	88	-431.5	W45	161.9	162.5	324.4
R21	-77.9	98.1	-176	R47	-448	151.7	-599.7	W21	-411.3	73.2	-484.5	W46	-317.5	70.9	-388.5
R22	-476.5	304.1	-780.5	R48	-82.3	114.6	-196.9	W22	-408.1	70.1	-478.2	W47	-315.9	80.8	-396.7
R23	-434.6	290.2	-724.8	R49	-391.7	56.5	-448.3	W23	-400.1	148.9	-549	W48	-288.3	97.1	-385.4
R24	-253.6	212.2	-465.8	R50	-393	37.7	-430.7	W24	-387.3	111.2	-498.6	W49	-190.2	84.1	-274.4
R25	-308.7	214.2	-522.9	R51	-409	31.8	-440.8	W25	-417.9	17.1	-435	W50	-40.9	36.3	-77.2
R26	-391.1	267.6	-658.8	R52	-416.9	6	-422.9								

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, °	<i>С учётом застройки</i>	
	$P_{\text{MIN}}, \text{Па}$	$P_{\text{MAX}}, \text{Па}$
0	-3160	1787
15	-1289	789
30	-1130	668
45	-1137	402
60	-478	32
75	-1144	493
90	-1378	589
105	-1095	281
120	-880	115
135	-3541	826
150	-2408	681
165	-3223	839
180	-2675	1218
195	-2082	1531
210	-2110	1888
225	-2630	2256
240	-3280	2804
255	-4112	2908
270	-3501	2254
285	-4041	2745
300	-5836	2938
315	-3544	2160
330	-2955	2189
345	-3278	1485

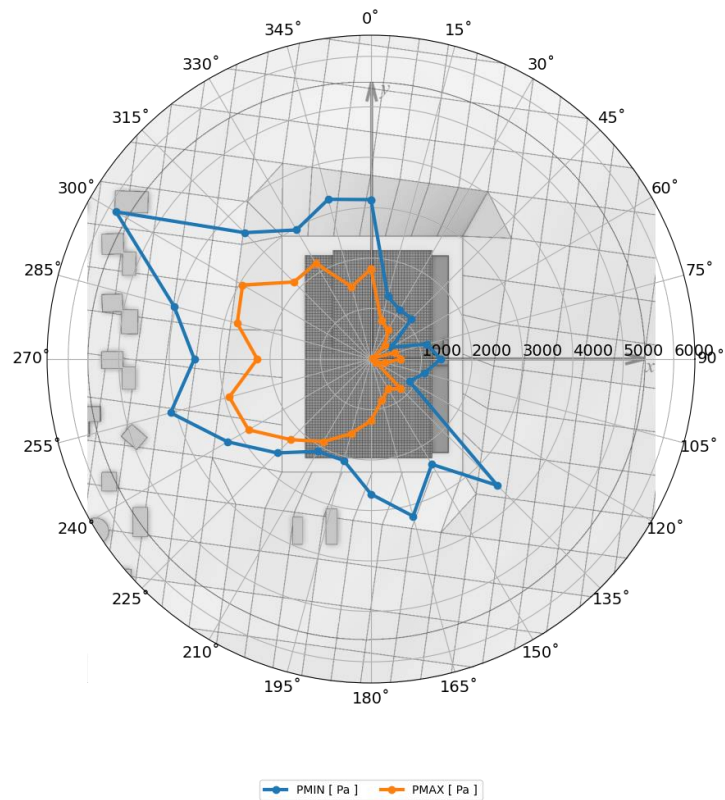


Рис. Огибающие максимального (оранжевая линия) и минимального (синяя линия) пиковых значений давления на ограждающие (фасадные) конструкции *Объекта* в зависимости от направления ветра, Па (значения приведены по модулю).

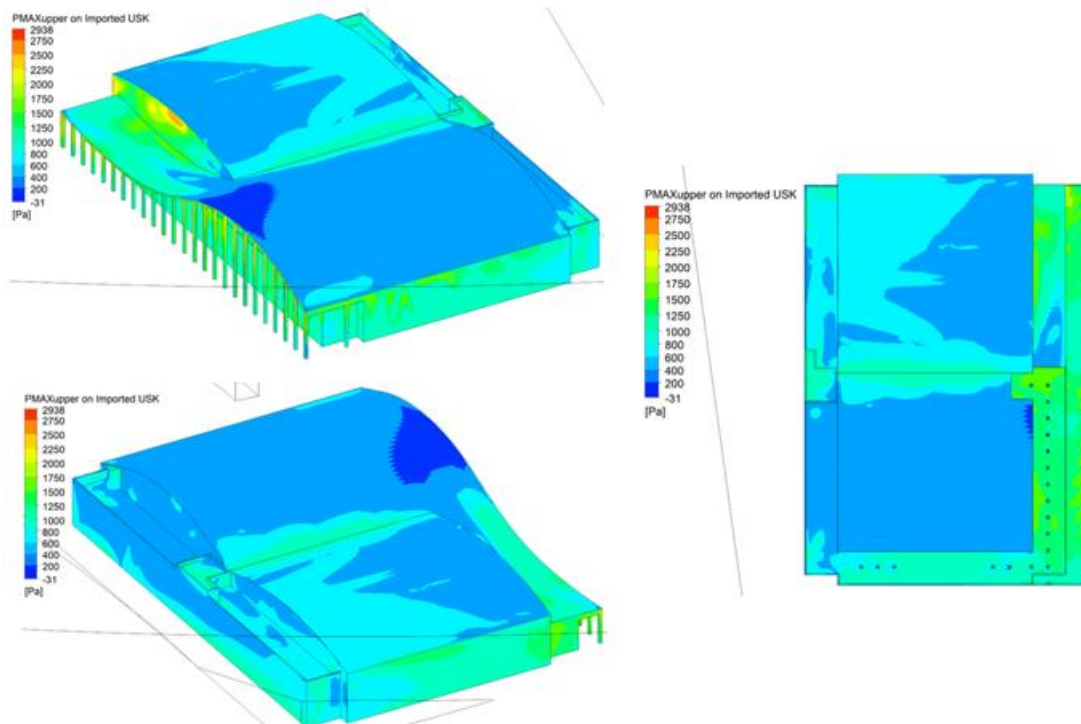


Рис. Верхняя огибающая максимальных значений ветрового давления (Па) на ограждающие (фасадные) конструкции.

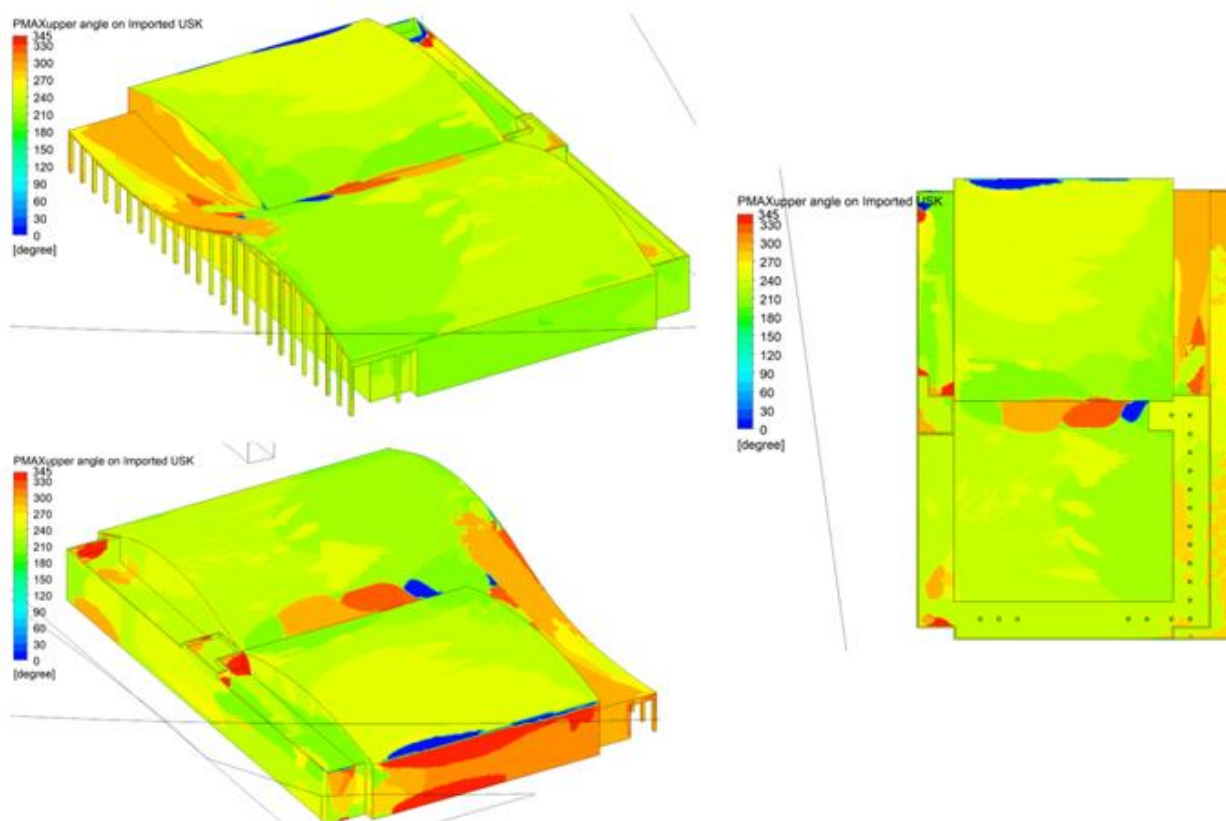


Рис. Углы атаки ветра ($^{\circ}$), при которых реализуется верхняя огибающая максимальных значений ветрового давления на ограждающие (фасадные) конструкции.

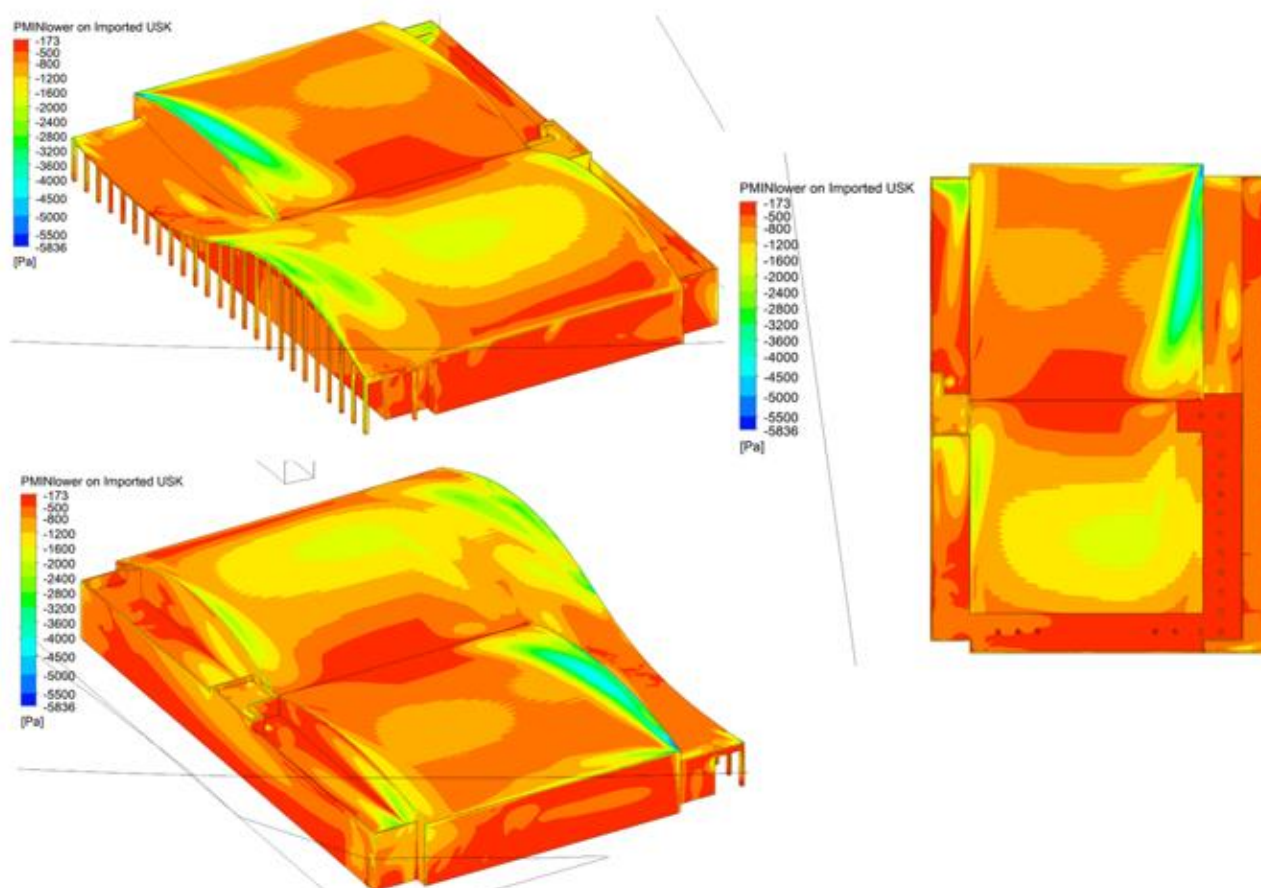


Рис. Нижняя огибающая максимальных значений ветрового давления (Па) на ограждающие (фасадные) конструкции.

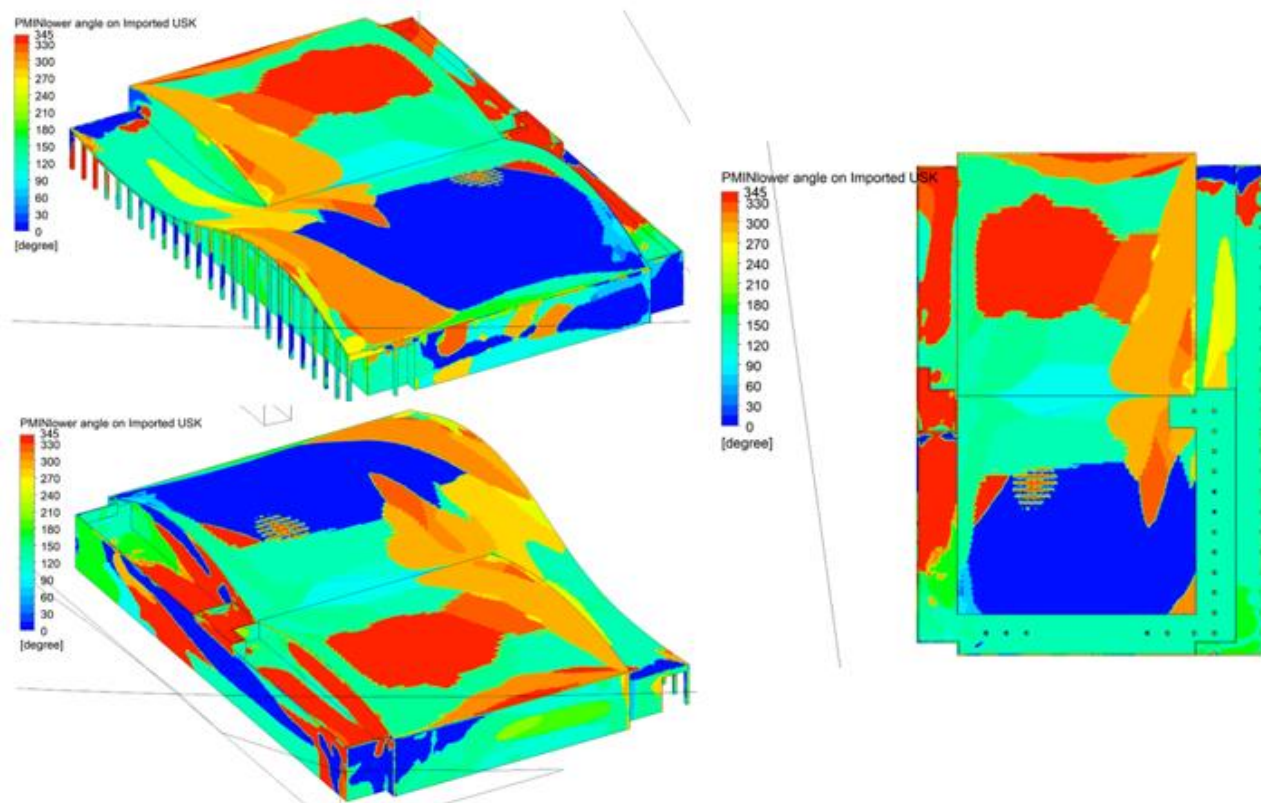


Рис. Углы атаки ветра ($^{\circ}$), при которых реализуется нижняя огибающая минимальных значений ветрового давления на ограждающие (фасадные) конструкции

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 *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;

$c_e = 1.0$ 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.6, Б.9 и Б.13 Приложения Б к СП и по результатам моделирования, представленным в разделе 6.2 настоящего отчета.

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.

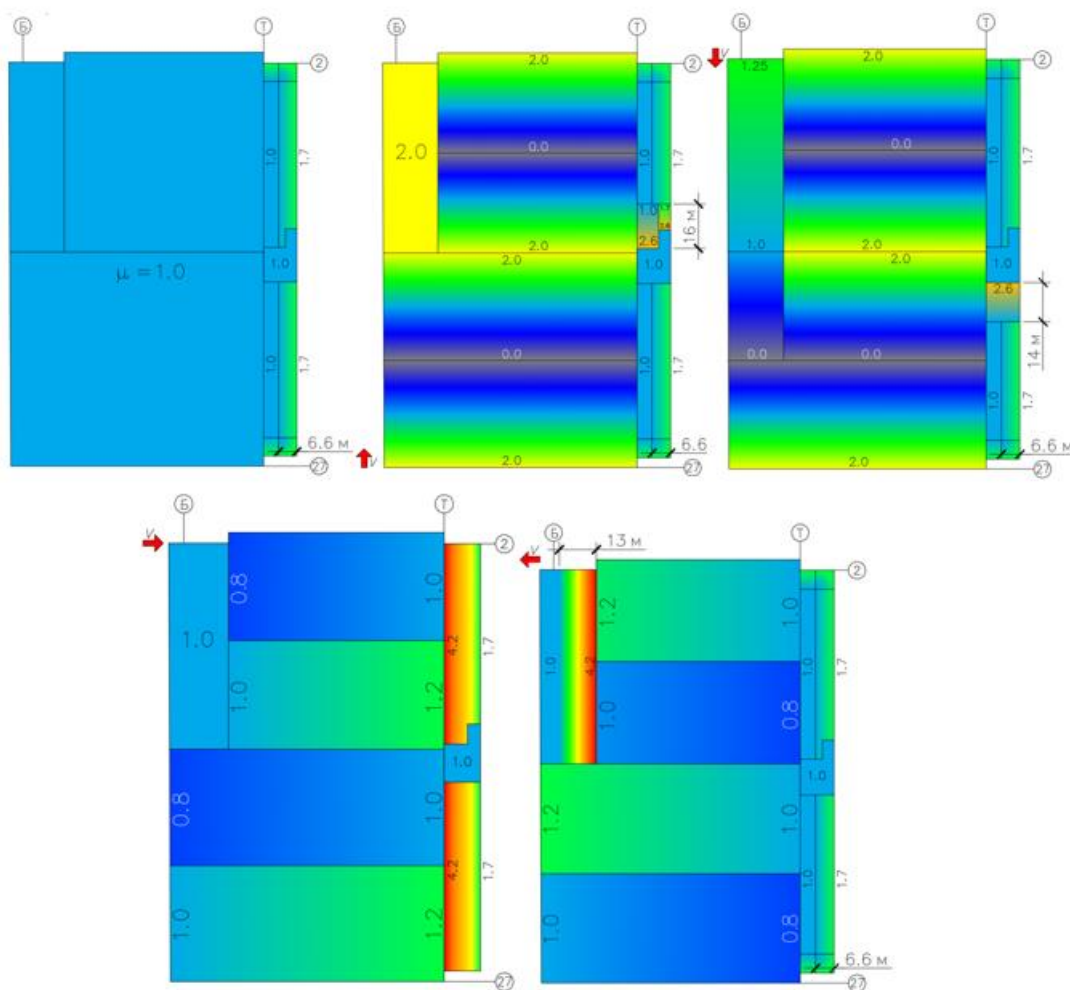


Рис. Различные схемы расчётного коэффициента формы μ для покрытия Объекта

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. 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.

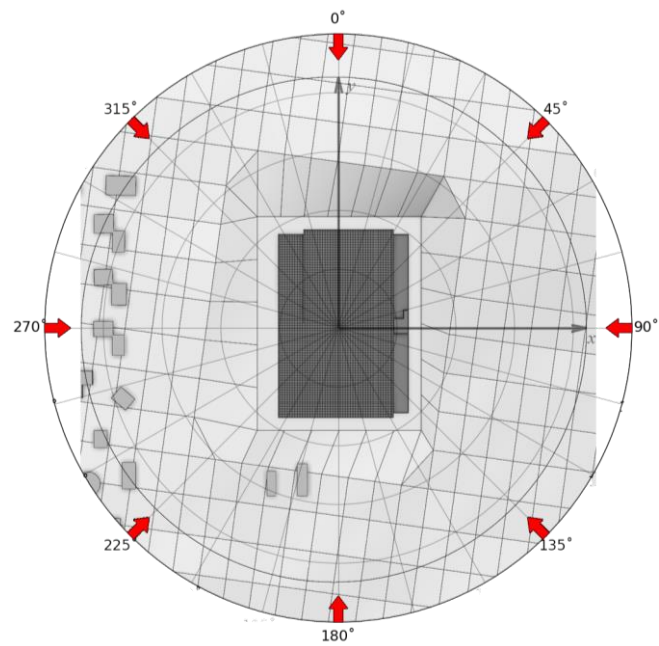


Рис. Расчетные направления ветрового потока покрытий *Объекта*.

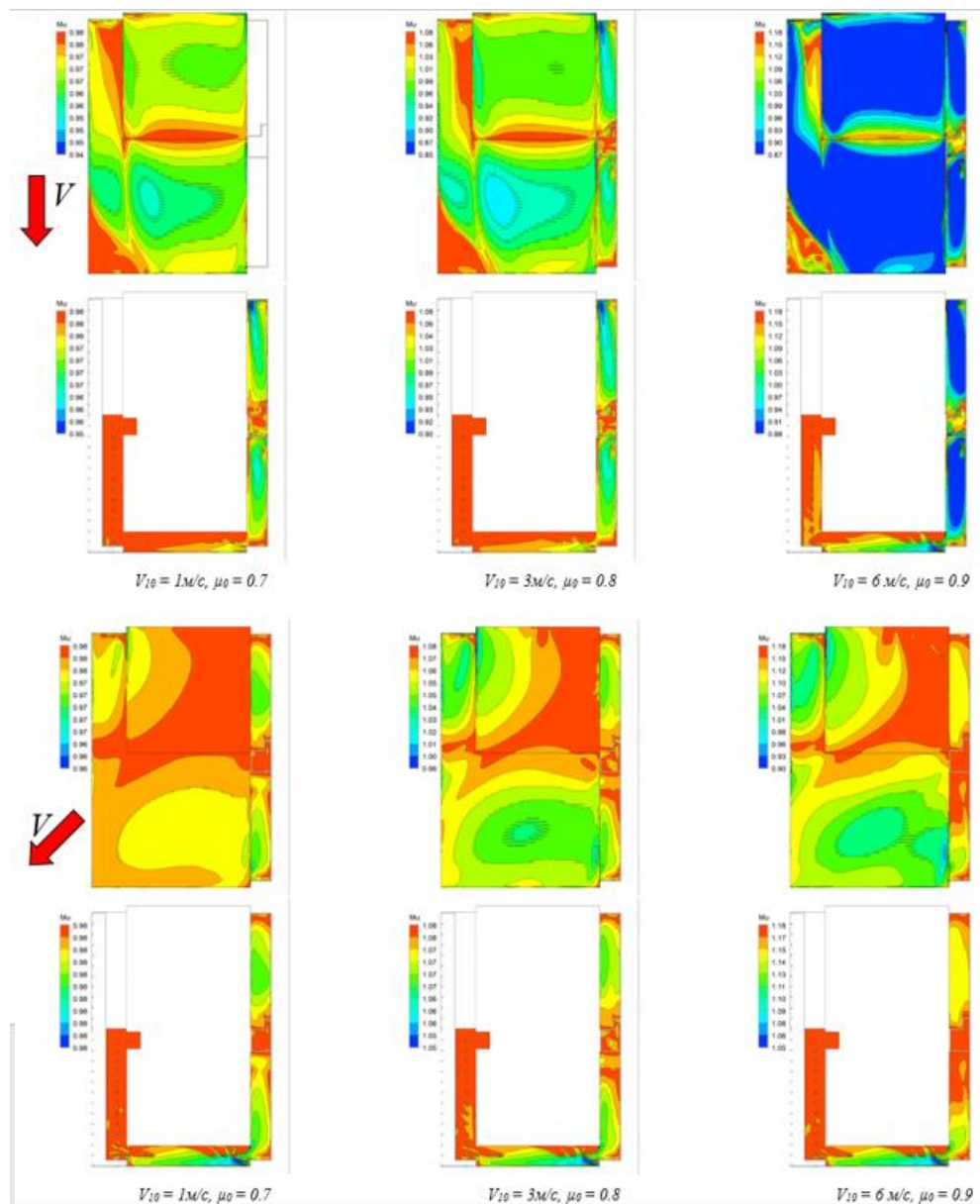


Рис. Смоделированный коэффициент формы μ для направлений ветра 0° и 45°

7. Выводы и рекомендации

По результатам выполненного комплексного аэродинамического исследования по проектируемому Объекту «Универсальный спортивный комплекс» (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 значения нагрузок 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. 6.1-6.5 настоящего отчёта, полученные по схемам Б.1, Б.6, Б.9 и Б.13 Приложения Б к СП и по результатам моделирования, представленным в отчет о НИР.