

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.

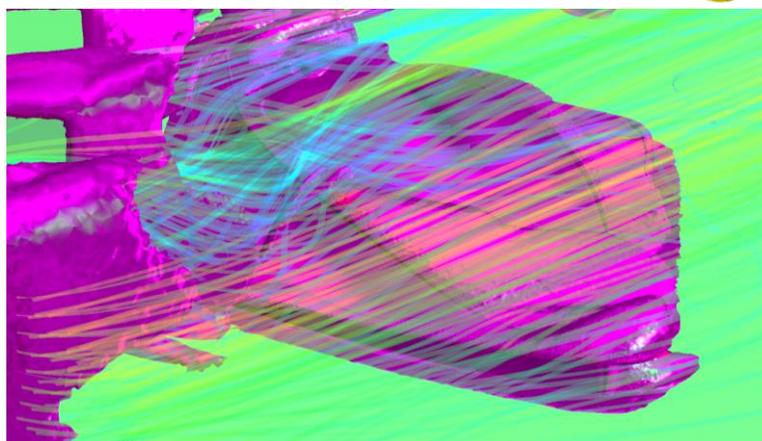
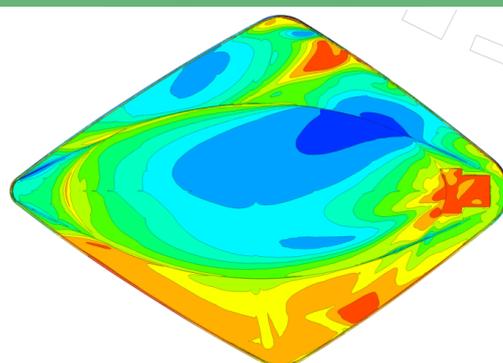
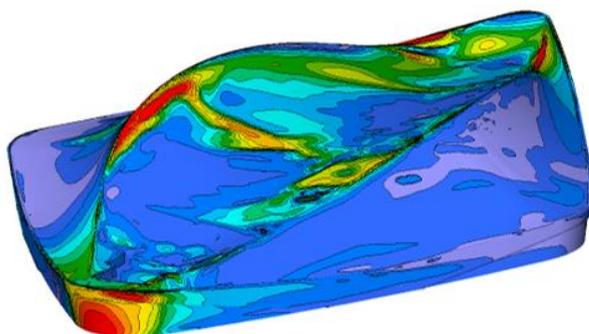
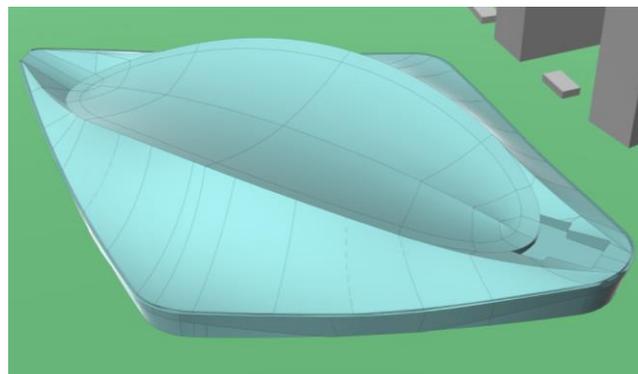
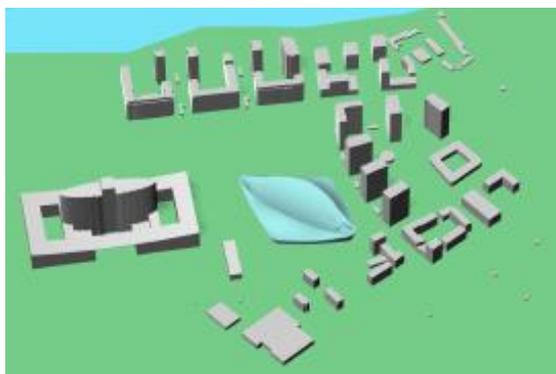
125124, Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д.18, эт. 8, помещ. IX, ком. 13, т. (499)706-8810, e-mail: stadyo@stadyo.ru

Инв. № МТП-2021/05/31-01

Научно-технический отчет по договору № МТП-2021-02/1519-300/17 от 31.05.2022.

Этап 1

Комплексные аэродинамические исследования по Объекту, на основе экспериментального (физического) и численного (математического) моделирования



1. Исходные данные. Постановка задач

Постановка задач расчетно-экспериментальных 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, существующей и перспективной окружающей застройки и различных направлений ветра.
3. Разработка физических моделей (макетов) Объекта с учетом перспективной окружающей застройки.
4. Выявление наиболее опасных и характерных направлений ветра на основе анализа суммарных ветровых нагрузок на несущие конструкции сооружений, полученных в результате численного моделирования.
5. Определение расчетных средних и пульсационных составляющих ветровой нагрузки на несущие конструкции для исследуемых направлений ветра на основе численного моделирования.
6. Определение распределения пикового (минимального и максимального) ветрового давления на ограждающие конструкции Объекта на основе численного моделирования.
7. Определение средних, максимальных, минимальных и пиковых аэродинамических коэффициентов на основе физического (экспериментального) моделирования в аэродинамической трубе.
8. Проведение сопоставления результатов математического (численного) и физического (экспериментального) моделирования ветровых нагрузок.
9. Определение распределения снеговых нагрузок на конструкции покрытия Объекта на основе синтеза результатов математического и физического моделирования, а также нормативной методики.

Площадка строительства, рельеф и застройка объекта

Земельный участок под строительство Объекта (Сёрфинг-центр «Волна») расположен по адресу: город Москва, внутригородская территория муниципальный округ Хорошёво-Мнёвники, улица Нижние Мнёвники



Рис. Исходная геометрия (вид сверху) и земельный участок на публичной кадастровой карте Москвы(источники: исходные материалы, переданные заказчиком; egrp365.org)

Участок расположен на территории Мневниковской поймы, ограниченной акваторией р. Москвы. Рельеф местности поймы преимущественно ровный, при этом противоположный берег представляет собой выраженный склон, что оказывает существенное влияние на формирование ветрового фронта. Местность на границах расчетной области, принятой в модели, в основном занята городской застройкой и густыми лесными массивами. Таким образом, согласно СП 20 принят тип местности *B*, ветровой район *I*.



Рис. Участок строительства на карте Москвы (источник: google.maps)

В Москве, как и в других больших городах мира, естественно-погодные условия в значительной степени подвержены воздействиям самого города, его сложного хозяйства. Внутри города наблюдаются микроклиматические различия, обусловленные территориальной застройкой, размещением промышленных установок, характером подстилающей поверхности, рельефом.

Москва – это возвышенные северные и южные окраины столицы и замкнутая между ними котловина центральной части города, открывающаяся к востоку и юго-востоку.

В целом территория Москвы равнинная. Основная часть города расположена на высоте 30-35 м над уровнем Москвы-реки (150 м над уровнем моря). Самая высокая часть Москвы приурочена к Теплостанской возвышенности (около 250 м над уровнем моря), расположенной на Юге и Юго-Западе города. Самые низкие части города, восточная и юго-

Рельеф вокруг в радиусе 2 км от Объекта имеет выраженный характер: равнинная часть поймы и возвышенность на противоположном берегу реки. Перепад высот в рассматриваемой области составляет в среднем 50-70 м.

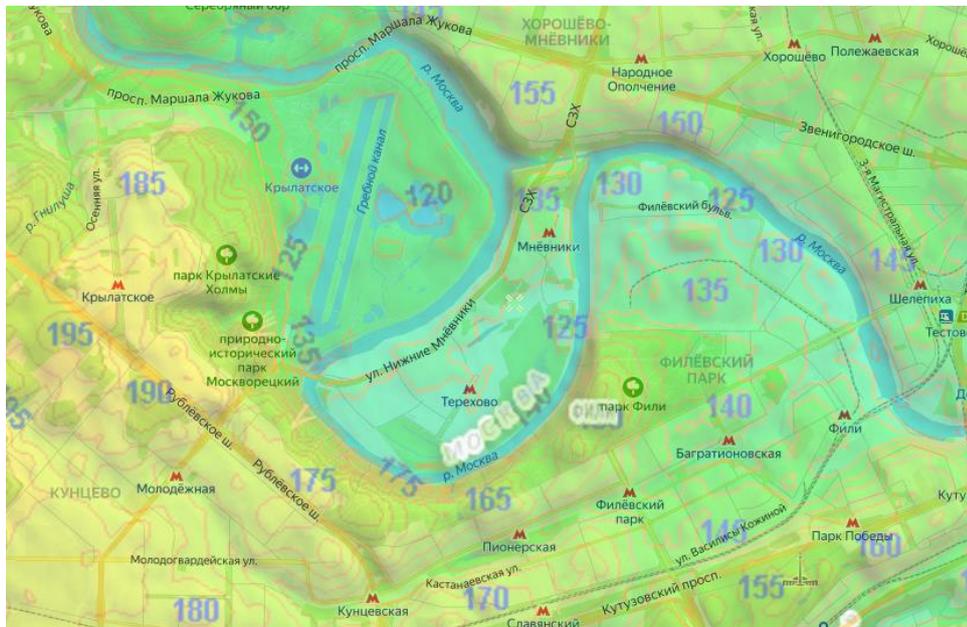


Рис. Карта высот возле площадки строительства

Краткая характеристика исследуемого Объекта

Объект представляет собой уникальное сооружение для размещения крытого серфинг-парка с профессиональной установкой волногенерации. Архитектурный облик здания определяется стеклянным фасадом и кровлей со световыми фонарями. а прилегающей территории будет реализовано дизайнерское оформление наружного освещения здания и окружающей площади, протяжённая скейт-трасса и зоны отдыха.

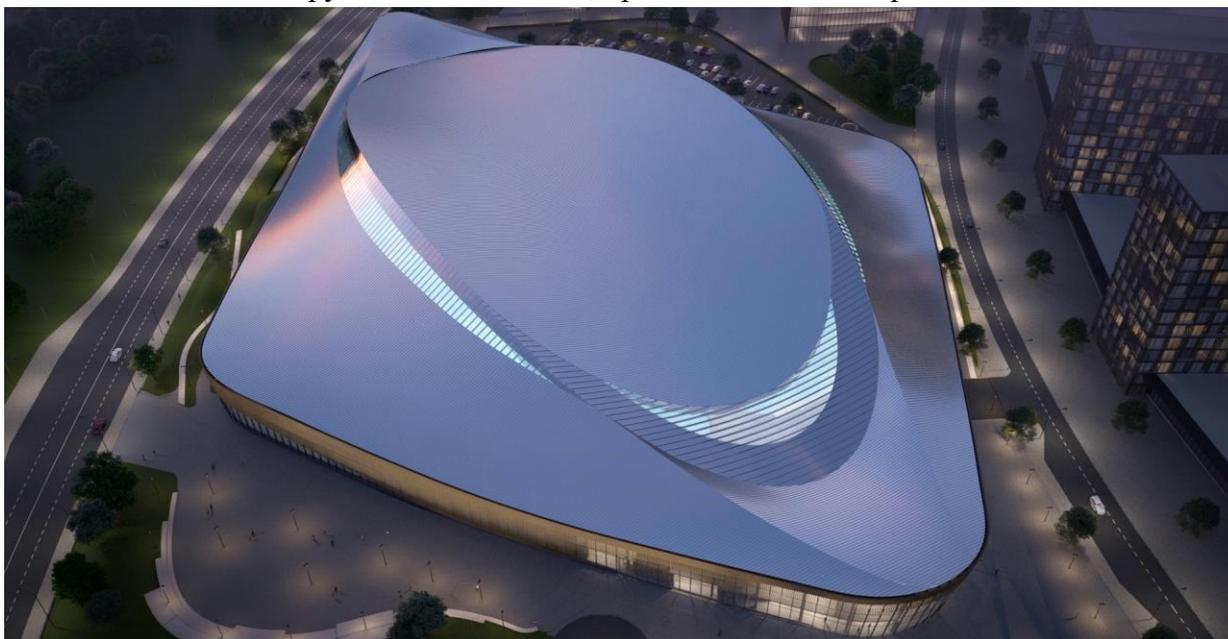


Рис. Рендер Объекта (концептуальная версия)

Конструктивные решения включают использование вантовых конструкций для перекрытия пространств больших пролетов. Покрытие бассейна образуется тремя канатными сетями, натянутыми между металлическими фермами и фасадными балками.

2. Разработка и верификация расчетных моделей

Для математического (численного) моделирования аэродинамики объекта были разработаны четыре модели:

- *модель 1* для определения ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции Объекта без учёта окружающей застройки и с учетом локального рельефа местности;
- *модель 2* для определения ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции Объекта с учётом окружающей застройки и с учетом локального рельефа местности;
- *модель 3* для определения снеговых нагрузок на конструкции покрытия Объекта без учёта окружающей застройки и с учетом локального рельефа местности;
- *модель 4* для определения снеговых нагрузок на конструкции покрытия Объекта с учётом окружающей застройки и с учетом локального рельефа местности.

Геометрические модели Объекта

Практическая подготовка расчетных моделей начинается с создания геометрической объемной модели Объекта и рельефа окружающей местности в радиусе 2000 м. Геометрия здания Объекта выполнена согласно предоставленной заказчиком модели. Рельеф моделировался на основе открытых GIS-данных. Объемные геометрические модели создавались в программе Rhinoceros 3D и модуле ANSYS SpaceClaim. Обе модели построены в истинных географических координатах и повернуты вокруг оси Z на 18.6° против часовой стрелки. Это позволило удобно назначить характерные расчетные углы атаки ветра, включая случаи, когда поток воздуха направлен перпендикулярно четырем сторонам фасада и «в углы» здания.

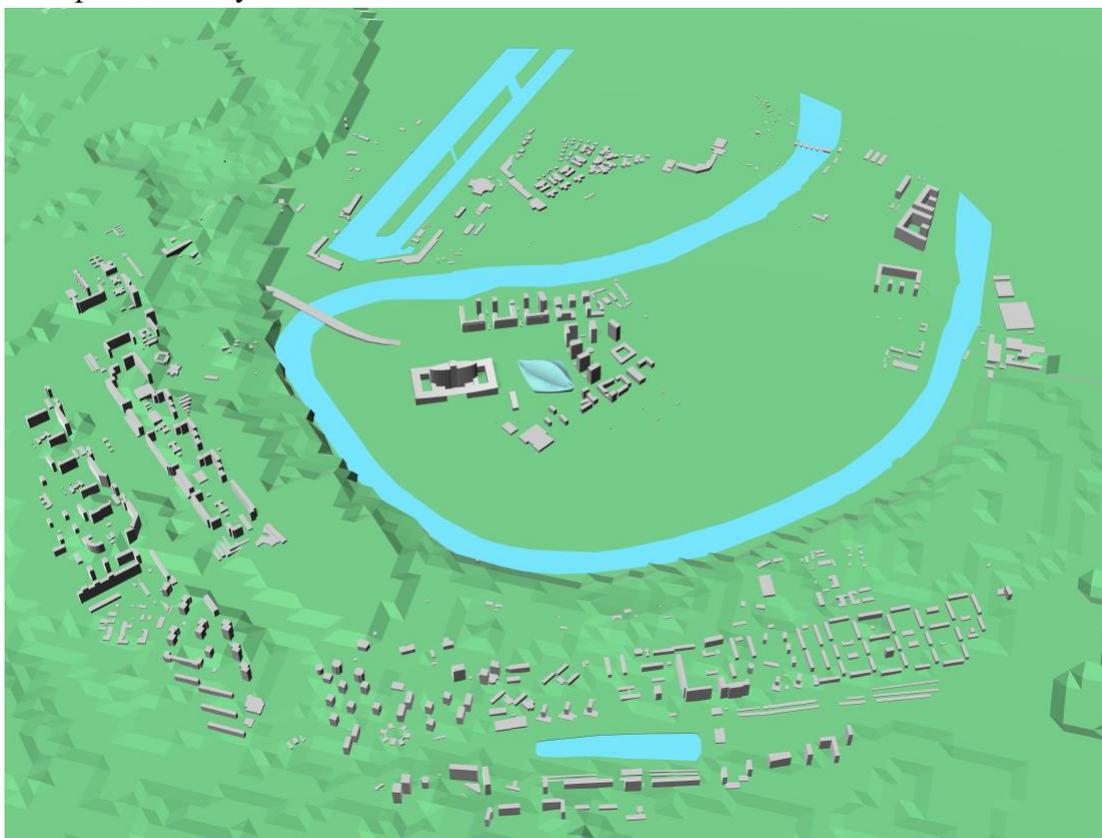


Рис. Геометрическая модель Объекта, рельефа и окружающей застройки. Общий вид

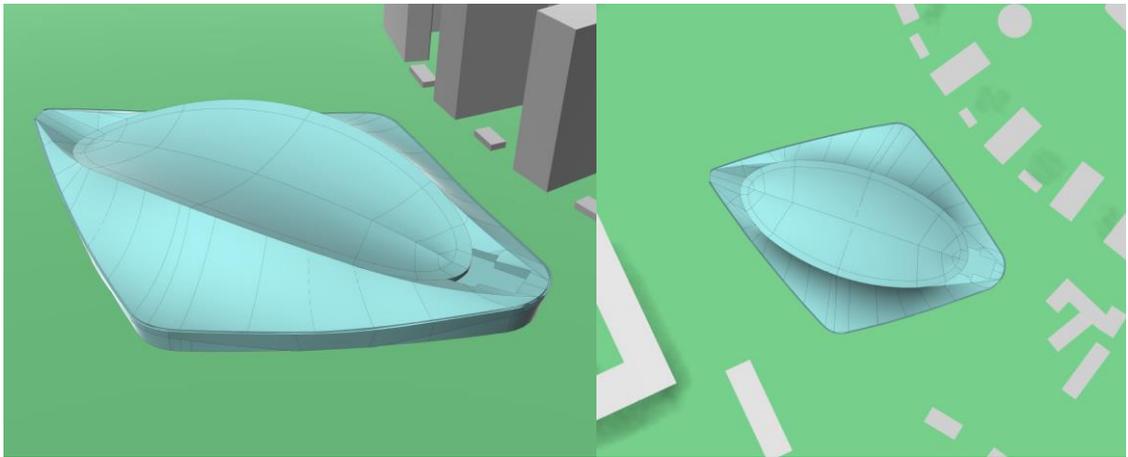


Рис. Геометрическая модель Объекта.

Конечнообъемные сетки

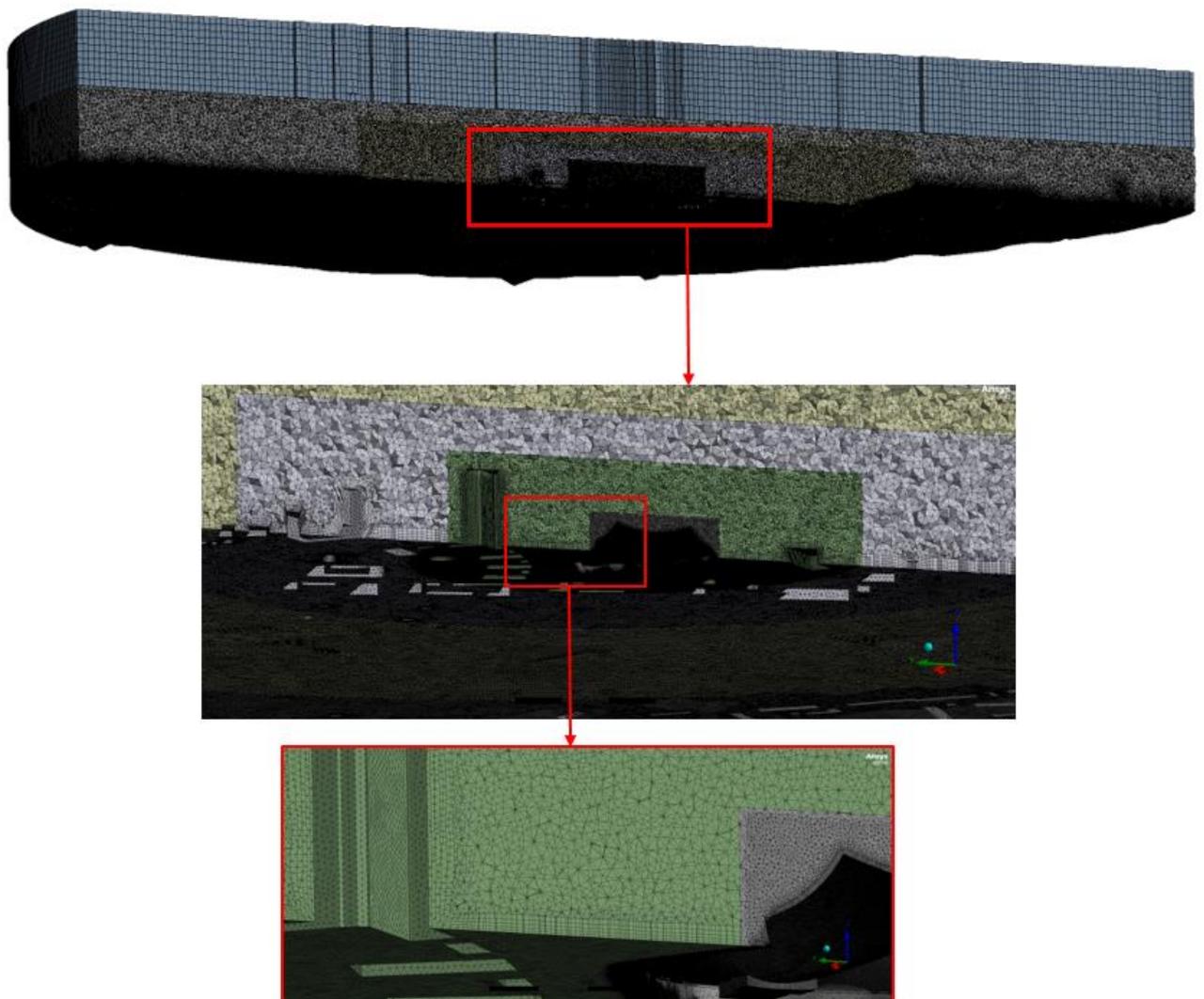


Рис. Модель 2. Разрез конечнообъемной сетки

Граничные условия

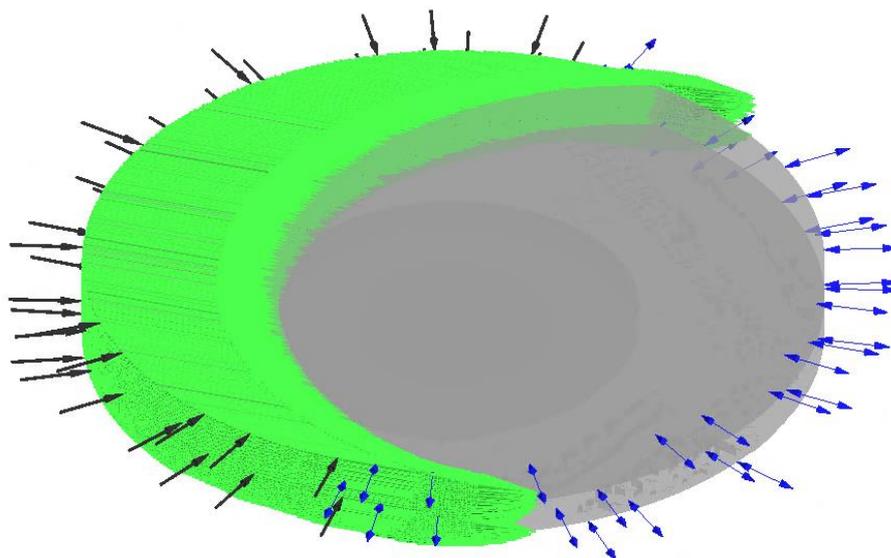


Рис. Расчетная область *Модели 1* (ANSYS CFX) с обозначенными граничными условиями.
Угол атаки 0°

Параметры расчетов

Для расчетных моделей математическое (численное) моделирование ветровых нагрузок проводилось в *стационарной постановке* с использованием подхода турбулентности *RANS* (модель турбулентности *SST*) при 24-х направлениях ветра (углы атаки ветра от 0° до 345° с шагом 15° , с заменой углов 30° , 150° , 210° и 330° на 36° , 144° , 213° и 327° соответственно).

Критерием окончания счета назначено максимальное количество итераций – 150, либо достижение максимальных невязок по давлению и по всем компонентам скорости 10^{-5} .

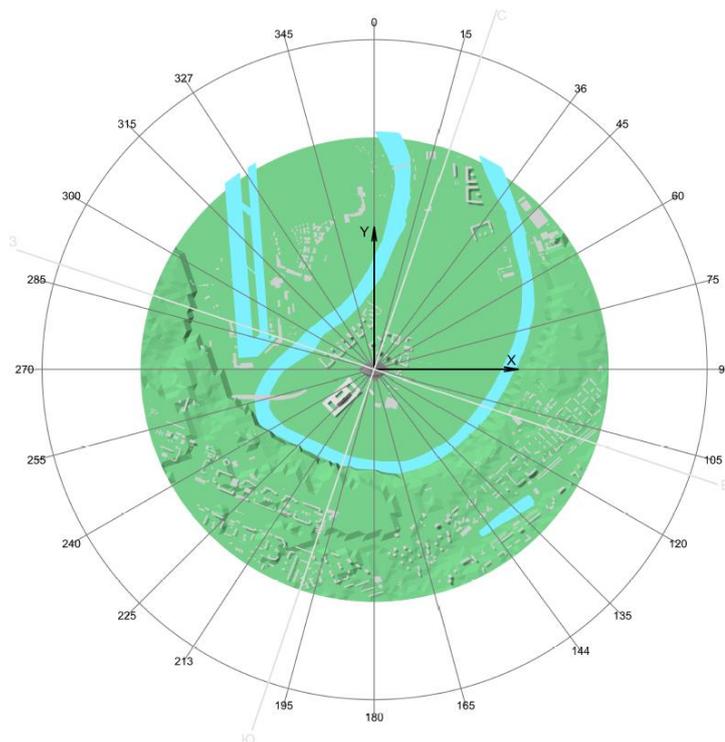


Рис. Расчетные направления для Объекта, $^\circ$

3. Определение ветровых нагрузок на основе математического моделирования

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 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 18.6° против часовой стрелки, ось Y – с Ю на С со сдвигом 18.6° против часовой стрелки, ось Z – вверх. Угол атаки ветра (Угол, $^\circ$) отсчитывается от Оси Y по часовой стрелке.

Схемы нумерации поверхностей сбора аэродинамических нагрузок (далее компоненты) приведены на рис. Компоненты представляют из себя наборы поверхностей, по которым производится интегрирование давлений.

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 отчете о НИР.

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 сооружения в табличном и графическом видах, полученные по результатам численного моделирования;
- пиковые ветровые давления на ограждающие конструкции сооружения в табличном и графическом видах, полученные по результатам численного моделирования;

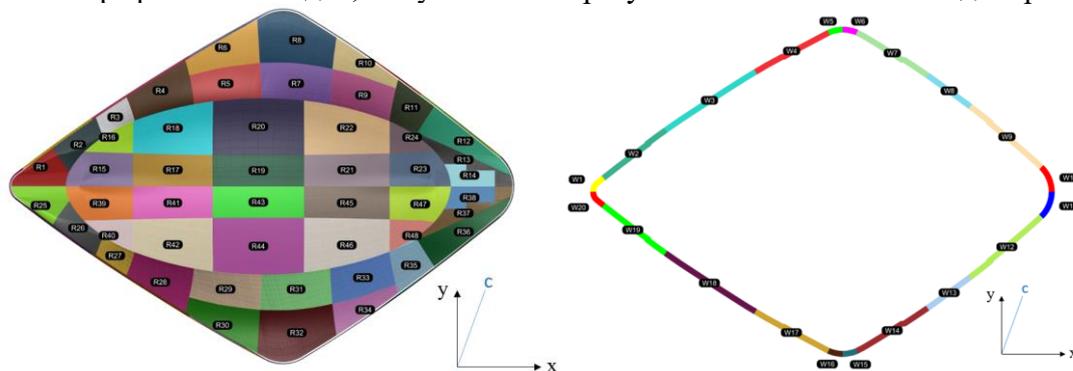


Рис. Схематичное обозначение номенклатуры характерных зон (покрытие здания)

Расчетные ветровые нагрузки на несущие конструкции

В пункте представлены:

– интегральные 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. В таблицах оранжевым цветом выделены направления, при которых реализуются максимальные нагрузки, синим цветом выделены дополнительно те направления, при которых реализуются характерные неравномерные распределения давлений на крыше. Подробнее см. Приложение Б к настоящему отчету;

– 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.

Ниже приведен пример оформления результатов для Модели 1.

Таблица. Интегральные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y), векторная сумма нагрузки (F_R) и суммарная вертикальная сила (F_z) в зависимости от направления ветра. *Модель 1*

$\alpha_{гол}, \text{ }^\circ$	<i>Кровля</i>	<i>Весь объект</i>		
	$F_z, \text{ кН}$	$F_x, \text{ кН}$	$F_y, \text{ кН}$	$F_R, \text{ кН}$
0	3093	439	-1593	1652
15	2863	199	-1698	1709
36	1961	-15	-1576	1576
45	1535	-104	-1379	1383
60	780	-168	-766	784
75	970	-220	-315	384
90	1560	-235	20	236
105	2789	-224	413	470
120	3437	-142	762	775
135	4128	-63	1002	1004
144	4395	-5	1130	1130
165	4851	176	1160	1173
180	5427	255	1093	1122
195	4481	171	1014	1028
213	4588	4	1110	1110
225	3932	83	949	952
240	2671	126	579	593
255	2200	188	317	369
270	1860	217	-36	221
285	2724	254	-370	449
300	4114	201	-1071	1089
315	5717	59	-1678	1680
327	5601	-61	-1675	1677
345	4933	451	-1625	1687

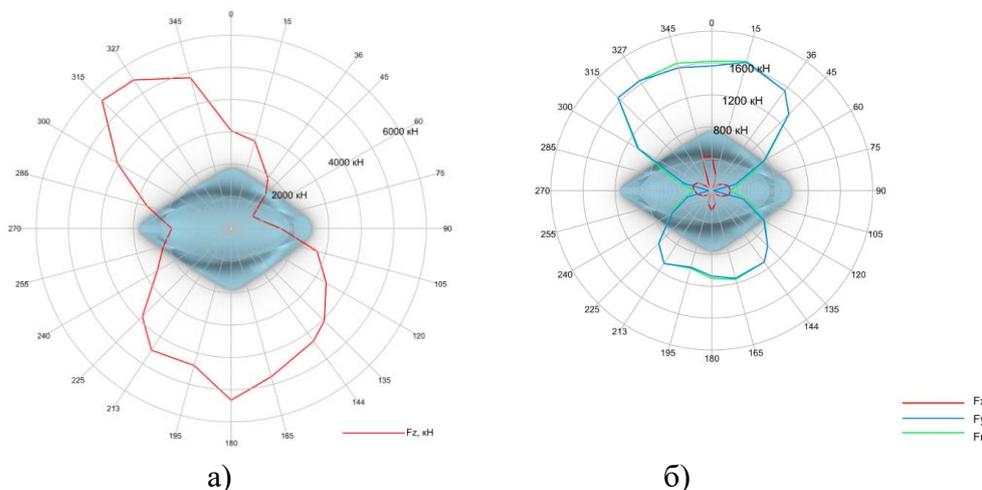


Рис. Интегральные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y), векторная сумма нагрузки (F_R) и суммарная вертикальная сила (F_z) в зависимости от направления ветра, кН (значения приведены по модулю) *Модель 1 а) Кровля, б) Весь Объект*

Таблица Средняя составляющая ветрового давления (P , Па) для компонент R1-R24 Объекта. Модель 1 – без учета окружающей застройки

Угол атаки ветра, °	№ Компоненты																							
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23	R24
0	-161	-339	-43	190	213	159	174	124	99	113	5	-203	-191	-154	-190	-281	-187	-161	-181	-294	-173	-198	-136	-140
15	-114	-171	13	137	173	174	234	139	201	142	24	-282	-307	-167	-149	-122	-126	-147	-162	-295	-262	-199	-233	-324
36	27	10	23	71	116	107	151	73	144	58	-21	-204	-247	-160	7	7	-42	-38	-112	-138	-30	-307	-95	-358
45	87	71	41	50	72	61	93	28	102	26	-41	-165	-194	-118	28	41	-53	-50	-1	-187	17	-299	-82	-276
60	83	98	63	25	-2	7	11	-38	73	10	22	-105	-104	-64	72	45	15	-43	-12	-110	-4	-155	0	-95
75	108	102	66	9	-56	-40	-53	-89	38	-11	42	-72	-65	-48	93	67	-5	-13	-45	-62	-13	-68	39	-7
90	94	85	63	2	-96	-58	-103	-120	-3	-29	38	-51	-42	-60	88	57	-26	-32	-63	-63	-14	-30	75	47
105	56	49	14	-46	-160	-55	-159	-133	-58	-55	9	-42	-38	-80	66	35	-37	-54	-74	-87	-26	-32	56	54
120	17	24	7	-100	-215	-44	-195	-106	-107	-64	-42	-50	-61	-118	50	27	-26	-46	-54	-86	-33	-48	6	17
135	-5	-15	-17	-109	-262	-63	-267	-74	-176	-71	-99	-87	-99	-140	-36	-26	-44	-30	-26	-69	-22	-72	-35	-41
144	-27	-52	-62	-94	-197	-142	-283	-66	-222	-66	-148	-121	-131	-149	-62	-63	-90	-66	-61	-50	-29	-90	-36	-90
165	-68	-59	-65	-69	-105	-75	-133	-113	-210	-90	-191	-197	-185	-98	-71	-66	-99	-71	-76	-42	-74	-70	-76	-145
180	-115	-142	-63	-74	-89	-74	-91	-75	-111	-100	-133	-190	-179	-137	-99	-66	-183	-95	-190	-126	-188	-101	-115	-104
195	-175	-208	-137	-86	-62	-62	-74	-53	-77	-56	-74	-99	-119	-85	-93	-99	-142	-65	-94	-30	-121	-77	-113	-98
213	-185	-144	-232	-242	-245	-74	-139	-114	-78	-78	-52	-6	-14	-23	-66	-125	-51	-73	-126	-65	-92	-81	-75	-65
225	-149	-63	-120	-156	-219	-64	-215	-82	-94	-124	-38	-20	-21	-8	-44	-49	-23	-56	-35	-56	-65	-46	-39	-43
240	-63	1	-48	-75	-118	-61	-136	-64	-85	-16	-22	-8	-1	44	7	18	-33	-28	-55	-59	-35	-50	7	-6
255	-38	24	4	-32	-88	-67	-115	-83	-58	-2	0	-3	12	81	55	36	-21	-22	-60	-64	-43	-57	25	2
270	-80	-4	30	4	-72	-75	-107	-106	-38	-16	28	40	51	119	48	10	-26	-40	-69	-69	-46	-49	39	17
285	-188	-52	39	35	-55	-76	-101	-113	-40	-33	21	17	8	98	-31	-43	-61	-115	-84	-110	-51	-61	29	6
300	-276	-138	-8	70	-8	-58	-68	-93	-33	-24	23	41	18	73	-146	-160	-95	-278	-63	-216	-61	-119	-24	-15
315	-345	-330	-122	107	65	-6	-13	-42	-32	-22	-26	-18	-8	-11	-196	-443	-109	-423	-185	-240	-126	-109	-41	-45
327	-323	-443	-130	118	149	55	49	17	-28	13	-39	-69	-61	-48	-222	-524	-259	-375	-227	-195	-123	-208	-79	-100
345	-213	-392	-53	222	170	93	71	56	26	51	-9	-169	-175	-150	-296	-441	-328	-223	-222	-383	-192	-215	-147	-99

Таблица Пульсационная составляющая ветрового давления (P_{puls} , Па) для компонент R1-R24 Объекта.
 Модель 1 – без учета окружающей застройки

Угол атаки ветра, °	№ Компоненты																							
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23	R24
0	110	250	115	145	134	76	170	121	115	95	68	166	139	113	140	225	103	82	95	119	81	105	66	87
15	101	134	77	78	100	83	123	80	147	94	93	210	191	118	65	53	71	94	109	160	167	143	169	236
36	41	34	38	71	111	80	117	69	146	84	128	159	150	72	5	7	53	31	115	80	73	186	96	205
45	50	56	55	66	85	71	103	88	138	85	136	124	119	68	40	30	81	59	67	148	42	222	66	194
60	70	68	59	42	24	31	53	77	104	70	102	91	77	50	71	48	36	65	29	108	25	135	39	91
75	67	64	54	35	69	55	68	92	64	44	65	70	56	40	52	58	32	39	53	71	46	73	96	37
90	62	60	57	43	90	61	98	101	53	42	67	61	73	57	54	51	44	49	69	73	44	52	76	58
105	51	47	36	68	127	63	127	107	71	61	32	56	73	66	42	40	48	65	81	89	59	55	62	70
120	52	48	34	87	149	52	142	87	97	62	60	55	83	79	50	36	39	50	53	74	33	64	58	79
135	11	27	24	89	172	71	178	62	126	57	83	76	86	75	49	48	64	47	41	65	34	69	39	55
144	29	29	37	59	129	117	187	68	156	58	99	79	97	79	35	50	46	50	73	59	39	78	42	84
165	84	48	25	24	84	55	67	79	119	73	118	121	139	106	38	71	72	55	58	41	50	59	64	118
180	101	121	60	36	44	34	44	51	46	66	56	108	136	87	69	68	113	91	93	143	60	56	80	65
195	120	141	82	38	18	27	31	28	36	30	33	60	98	66	79	91	86	67	71	52	63	120	48	60
213	81	118	150	159	164	70	97	105	55	69	37	21	30	37	58	99	72	72	91	78	54	43	36	28
225	80	31	70	100	137	59	132	78	66	98	37	24	25	17	35	43	39	58	52	59	72	62	41	56
240	75	35	56	71	96	61	101	62	70	33	30	21	37	41	49	44	54	48	43	62	32	47	25	20
255	72	37	24	45	79	64	92	71	60	29	29	23	40	48	62	47	42	42	65	69	51	62	30	28
270	88	28	42	33	73	73	88	88	46	35	35	39	50	62	61	25	46	50	72	67	54	53	38	28
285	142	56	67	61	66	79	91	101	48	45	31	35	51	53	86	56	83	100	89	91	59	58	33	22
300	152	99	110	101	66	93	80	102	50	45	37	47	52	60	124	121	85	202	58	176	88	116	53	49
315	170	237	174	127	94	122	47	78	55	47	49	41	43	40	97	295	115	256	154	115	78	45	26	24
327	181	269	167	134	113	113	84	61	60	30	54	78	56	42	165	299	197	205	136	102	86	151	45	61
345	119	252	118	113	126	76	117	50	57	31	37	137	115	85	226	248	194	143	108	172	118	117	64	44

Таблица. Суммарное ветровое давление (P_{sum} , Па) для компонент R1-R24 Объекта. Модель 1 – без учета окружающей застройки

Угол атаки ветра, °	№ Компоненты																							
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23	R24
0	-271	-589	-75	323	323	234	314	244	191	208	17	-368	-329	-266	-330	-506	-289	-243	-276	-413	-254	-303	-202	-227
15	-215	-305	28	205	253	257	351	219	346	235	52	-492	-499	-285	-214	-173	-197	-238	-270	-453	-429	-324	-402	-560
36	56	31	52	138	218	188	251	131	253	128	-10	-355	-397	-232	9	10	-96	-68	-227	-219	-66	-492	-174	-563
45	137	127	97	113	148	132	173	51	189	55	-49	-284	-313	-186	47	71	-133	-105	2	-334	49	-519	-138	-470
60	153	166	122	66	6	29	25	-73	144	30	60	-185	-181	-114	144	92	44	-100	-41	-218	-14	-289	8	-185
75	175	166	121	19	-126	-93	-122	-180	82	-18	83	-124	-119	-88	145	125	-14	-34	-99	-133	-28	-141	126	-16
90	152	143	120	3	-186	-116	-201	-221	-5	-63	102	-86	-81	-116	142	108	-58	-74	-132	-136	-34	-72	147	102
105	93	89	27	-91	-287	-111	-286	-240	-129	-115	19	-71	-49	-143	108	73	-82	-118	-155	-176	-63	-75	114	125
120	39	44	10	-185	-364	-90	-337	-193	-205	-126	-101	-105	-102	-197	100	58	-61	-94	-108	-159	-64	-105	39	80
135	-13	-39	-39	-198	-434	-133	-445	-136	-302	-128	-181	-163	-185	-215	-84	-74	-108	-78	-67	-135	-56	-140	-72	-95
144	-42	-81	-99	-153	-326	-259	-470	-134	-378	-123	-247	-200	-228	-228	-97	-113	-136	-116	-134	-109	-68	-168	-77	-175
165	-153	-107	-89	-93	-189	-131	-200	-192	-329	-163	-309	-318	-322	-192	-110	-138	-171	-126	-134	-83	-124	-129	-140	-264
180	-216	-263	-123	-110	-133	-108	-135	-126	-158	-167	-189	-297	-315	-224	-168	-134	-296	-186	-283	-269	-248	-157	-194	-169
195	-295	-349	-219	-124	-81	-89	-105	-80	-113	-86	-108	-159	-217	-144	-172	-190	-228	-133	-165	-81	-184	-197	-161	-157
213	-266	-262	-381	-401	-409	-144	-236	-218	-133	-147	-89	-9	-34	-43	-123	-224	-123	-145	-217	-142	-146	-124	-112	-94
225	-230	-94	-190	-257	-356	-123	-347	-160	-160	-222	-74	-39	-43	-15	-79	-92	-62	-114	-87	-114	-137	-108	-79	-99
240	-134	0	-104	-147	-214	-122	-238	-126	-155	-41	-51	-19	3	83	18	52	-83	-70	-98	-121	-67	-97	19	-13
255	-78	53	10	-76	-167	-131	-208	-154	-114	-5	0	-5	26	127	116	84	-52	-55	-126	-133	-93	-118	49	2
270	-144	-7	72	10	-145	-149	-195	-194	-77	-35	61	76	97	180	109	30	-62	-89	-141	-136	-101	-103	74	38
285	-327	-98	93	79	-118	-153	-192	-215	-85	-72	51	35	14	148	-65	-92	-140	-215	-173	-200	-111	-119	57	12
300	-428	-238	-3	141	-16	-103	-148	-195	-82	-64	59	86	41	128	-270	-281	-180	-481	-121	-392	-149	-234	-65	-39
315	-515	-567	-216	199	123	-6	-22	-84	-87	-68	-75	-54	-24	-27	-292	-738	-224	-679	-339	-355	-203	-154	-67	-70
327	-504	-712	-226	212	249	96	103	32	-63	28	-89	-147	-112	-81	-387	-824	-457	-580	-363	-295	-209	-358	-124	-162
345	-332	-645	-90	334	268	170	130	105	51	81	-18	-306	-290	-235	-522	-690	-522	-345	-330	-555	-310	-333	-211	-143

Пиковые ветровые давления на ограждающие конструкции

В пункте представлены:

- огибающие максимального и минимального значений давления на ограждающие (фасадные) конструкции 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.

Таблица. Огибающие минимального и максимального значений давления на фасадные конструкции здания в зависимости от направления ветра

Угол, °	Модель 1		Модель 2	
	Максимальное значение ветрового давления P _{MAX} [Па]	Минимальное значение ветрового давления P _{MIN} [Па]	Максимальное значение ветрового давления P _{MAX} [Па]	Минимальное значение ветрового давления P _{MIN} [Па]
0	670	-1974	556	-843
15	649	-2647	458	-639
36	506	-3710	434	-382
45	513	-3705	547	-939
60	551	-1956	593	-1997
75	534	-894	531	-1769
90	440	-756	459	-713
105	448	-1175	253	-308
120	452	-2064	378	-2030
135	307	-2269	334	-1280
144	287	-2366	265	-1160
165	338	-1916	212	-975
180	357	-1461	476	-1540
195	321	-1622	279	-734
213	270	-1907	70	-198
225	311	-2062	205	-311
240	321	-1000	202	-544
255	348	-797	385	-930
270	392	-763	261	-637
285	483	-1142	387	-790
300	538	-1755	437	-794
315	521	-3211	430	-492
327	472	-3086	418	-817
345	520	-2049	491	-675

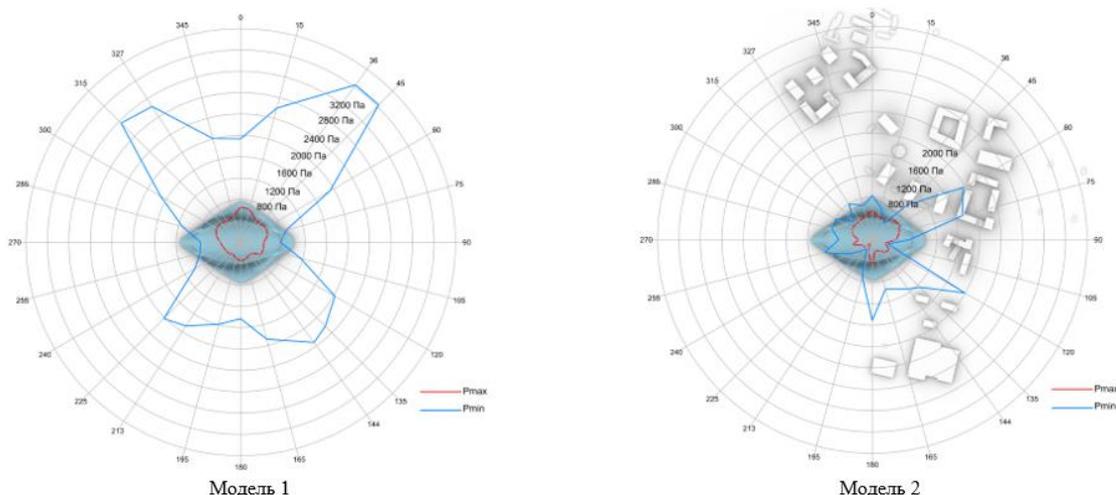


Рис. Огибающие максимального (красная линия) и минимального (синяя линия) пиковых значений давления на ограждающие конструкции в зависимости от направления ветра, Па (значения приведены по модулю)

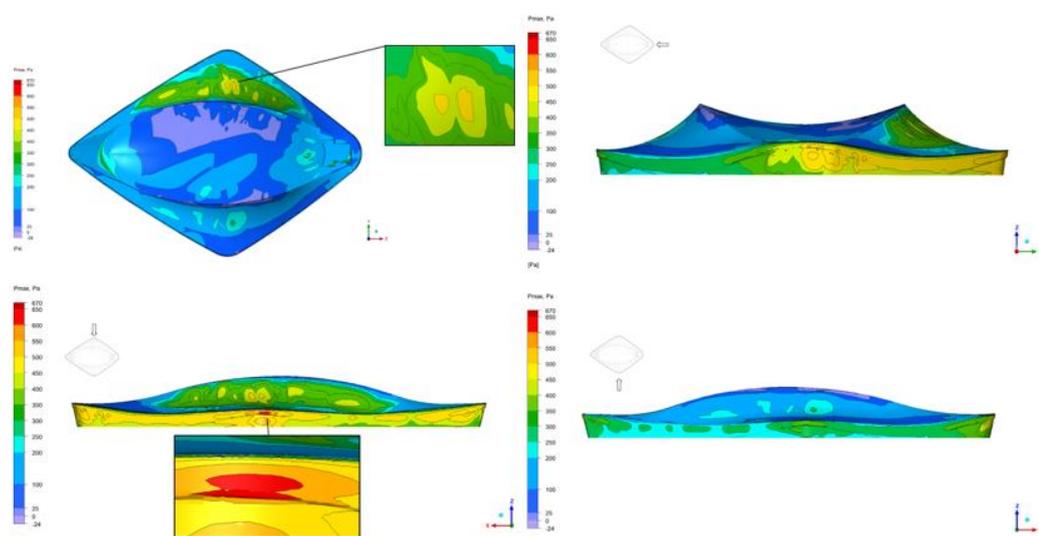


Рис. Верхняя огибающая максимальных значений ветрового давления (Па) на ограждающие конструкции фасадов, Модель 1

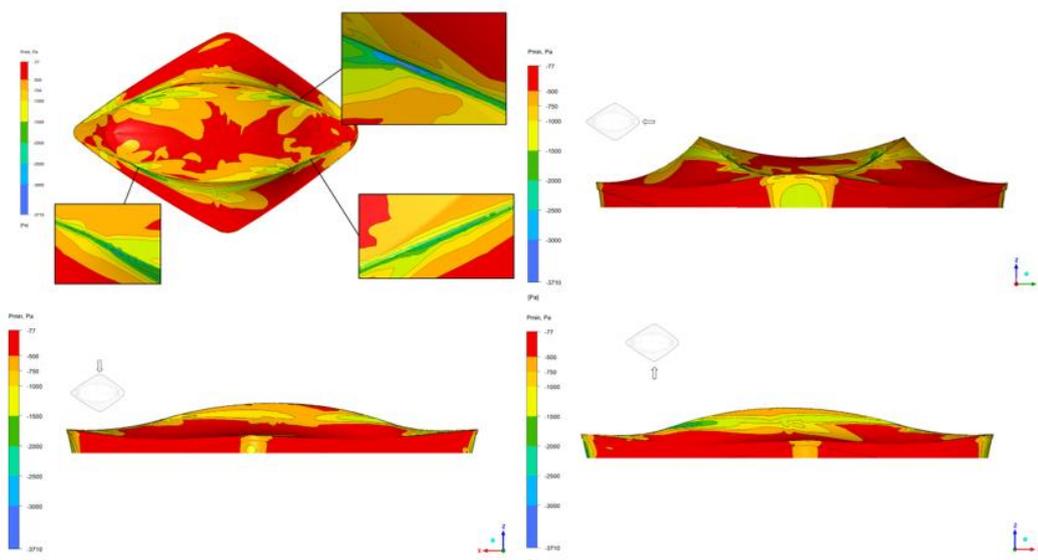


Рис. Нижняя огибающая максимальных значений ветрового давления (Па) на ограждающие конструкции фасадов, Модель 1

4. Определение аэродинамических коэффициентов на основе физического моделирования

Физическая модель Объекта

Для физического (экспериментального) моделирования была разработана и изготовлена модель исследуемого объекта, а также окружающей застройки. Учитывая размеры рабочей части аэродинамической трубы, был выбран максимально возможный из условий загромождения потока масштаб макетов 1:250. Исследуемая модель устанавливалась на автоматизированный поворотный стол, располагающийся в рабочей зоне аэродинамической трубы.

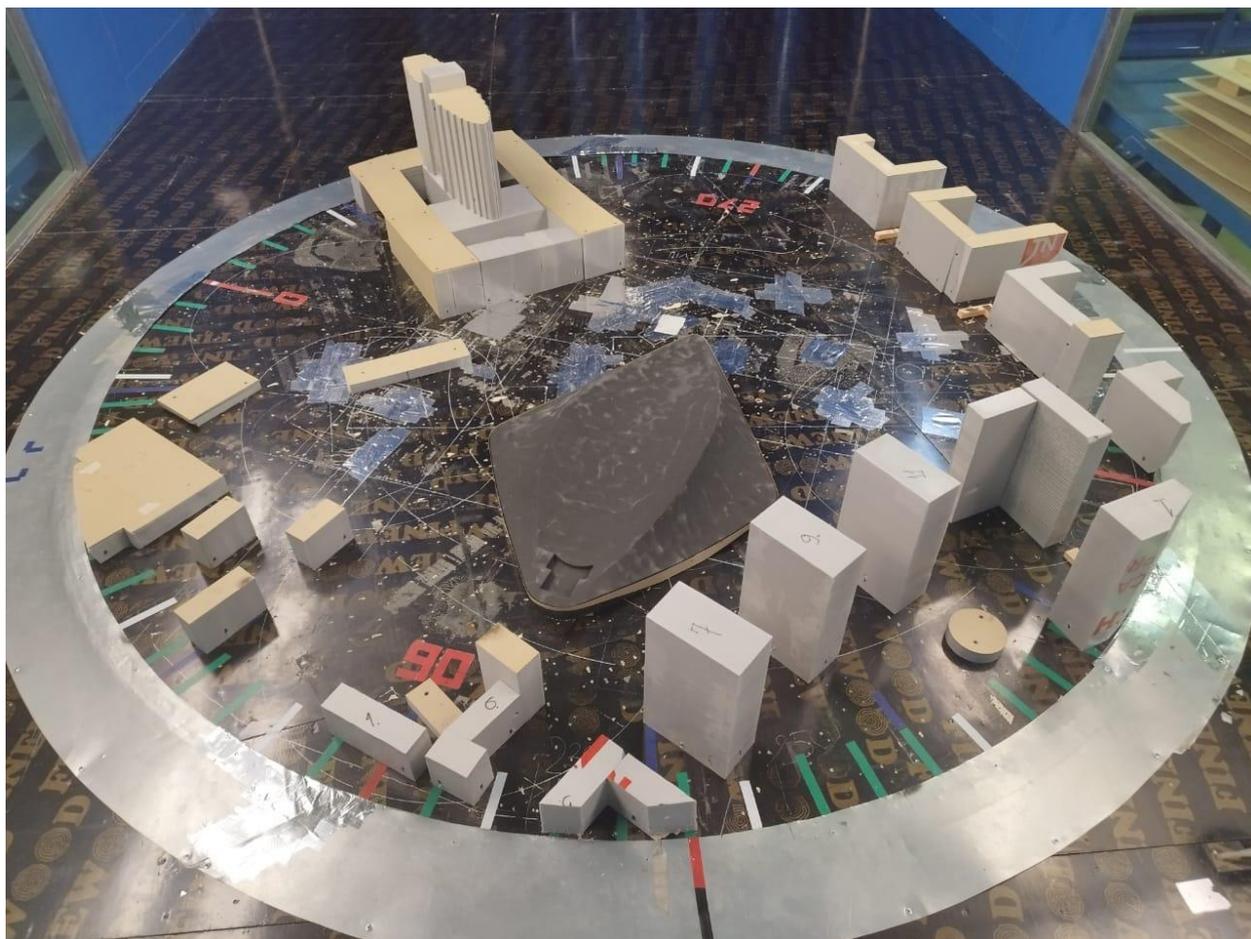


Рис. Физическая модель исследуемого объекта

Модель изготовлена из ПВХ по предоставленным Заказчиком исходным данным.

Модель имеет на поверхности точки сбора давления, расположенные примерно в серединах соответствующих зон сбора аэродинамических нагрузок, назначенных в математической модели. От каждого отверстия давление по медным, а затем по силиконовым трубкам передается на дифференциальные датчики давления.

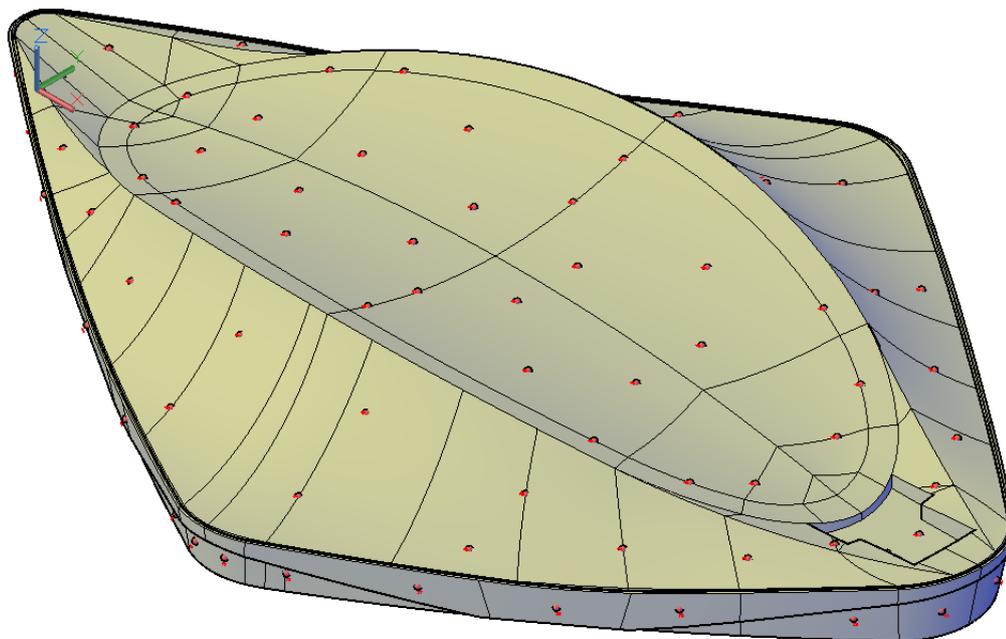


Рис. Модель с отметками расположения дренажных точек (точек измерения давления)

Таблица Соответствие номеров датчиков и зон сбора аэродинамических нагрузок, используемых в математическом моделировании

№ датчика	№ зоны						
1	R1	23	R20	45	R39	67	W7
2	R2	24		46	R40	68	
3	R3	25	R21	47	R41	69	W8
4	R4	26	R22	48	R42	70	W9
5	R5	27		49		71	
6	R6	28	R23	50	R43	72	W10
7	R7	29	R24	51		73	W11
8	R8	30	R25	52	R44	74	W12
9	R9	31	R26	53		75	
10	R10	32	R27	54	R45	76	W13
11	R11	33	R28	55	R46	77	W14
12	R12	34	R29	56		78	
13	R13	35	R30	57	R47	79	W15
14	R14	36	R31	58	R48	80	W16
15	R15	37	R32	59	W1	81	W17
16		38	R33	60	W2	82	
17	R16	39	R34	61		83	W18
18	R17	40	R35	62	W3	84	W19
19	R18	41	R36	63	W4	85	
20		42	R37	64		86	W20
21	R19	43	R38	65	W5		
22		44	R39	66	W6		

Результаты моделирования

Измеренное с помощью тензо-датчиков давление на поверхности модели исследуемого объекта в дренажных точках позволяет судить о распределении по фасадам и кровле объекта аэродинамического давления для 24-х направлений ветра, совпадающих с теми, что исследовались на основе математического моделирования. Ниже также представлены осредненные значения аэродинамических коэффициентов для каждой дренажной точки модели. Исследования проводились для 2 расчетных случаев: с учетом окружающей застройки и без нее.

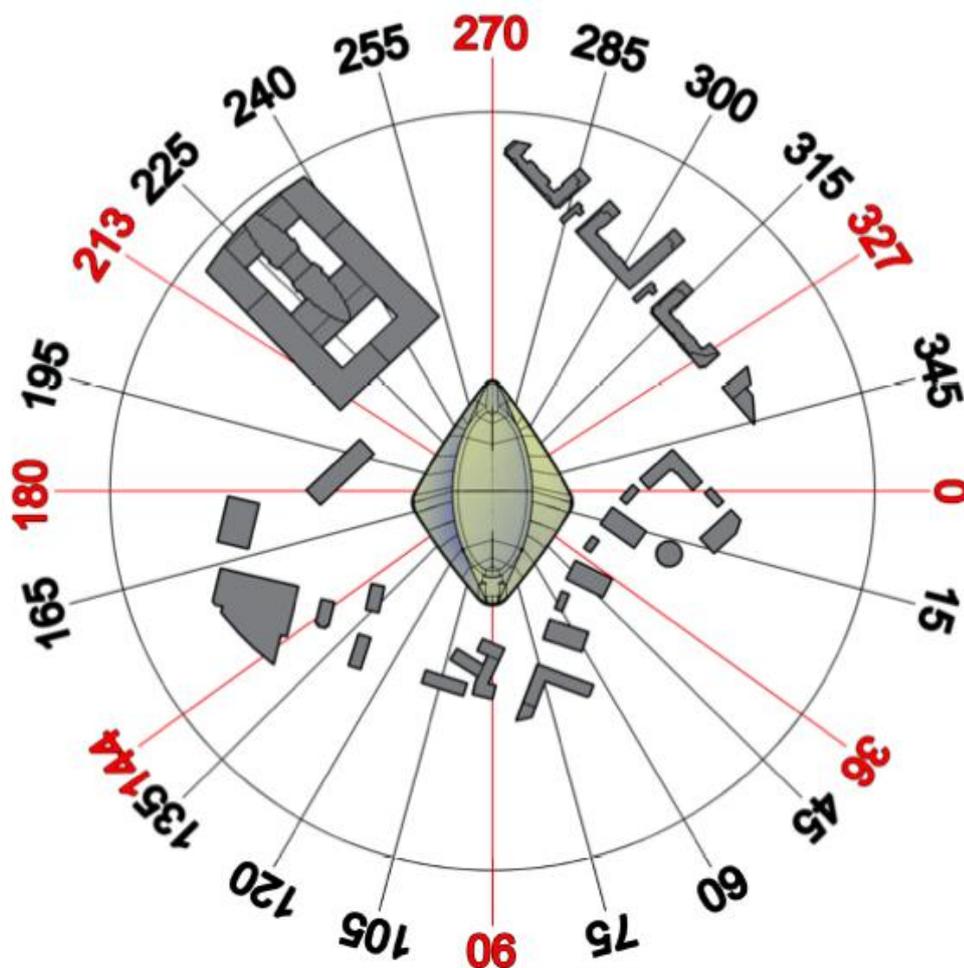


Рис. Направление набегающего потока при проведении экспериментальных исследований

В соответствии с требованиями СП 20 числа Рейнольдса сооружения и его модели должны находиться в одной и той же области автомодельного режима обтекания. С практической точки зрения основной особенностью зоны автомодельности является то, что в ней аэродинамические коэффициенты слабо зависят от числа Рейнольдса. Это обстоятельство позволяет с достаточной степенью надежности использовать результаты модельных испытаний при назначении ветровых нагрузок, действующих на реальные сооружения. Для исследуемой модели нижняя граница зоны автомодельности достигается при скорости ветрового потока порядка 7 м/с.

Ниже представлены результаты для ряда точек.

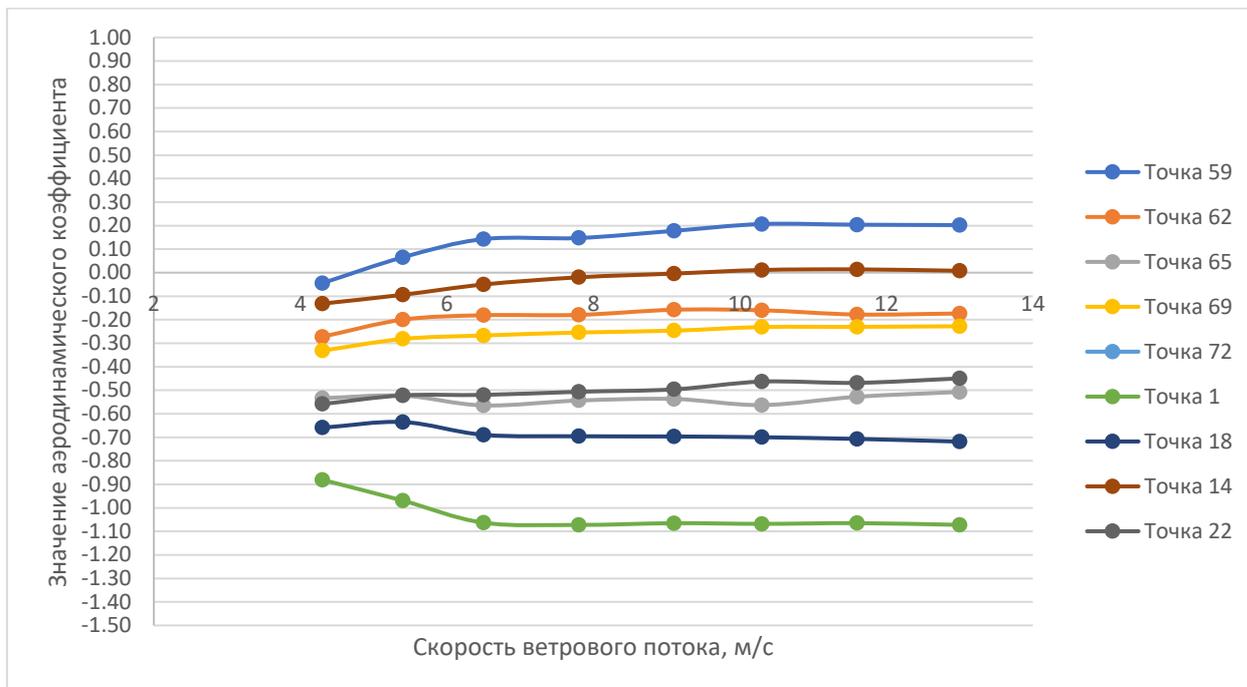


Рис. Зависимость значения аэродинамического коэффициента внешнего давления от скорости ветрового потока в отдельных контрольных точках

Таблица Средние значения аэродинамических коэффициентов внешнего давления C_p в контрольных точках на поверхности фасадов исследуемого объекта без учета окружающей застройки (направления ветра 0°-165°)

№ точки (зоны)	0°	15°	36°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	144°	165°
1 (R1)	-1.11	-0.79	-0.18	-0.09	-0.11	0.04	-0.01	-0.03	-0.18	-0.16	-0.22	-0.44
2 (R2)	-0.21	-0.14	-0.04	-0.05	0.00	0.04	0.06	0.02	-0.08	-0.19	-0.24	-0.52
3 (R3)	-0.19	-0.28	-0.27	-0.22	-0.11	-0.01	0.02	-0.04	-0.07	-0.17	-0.26	-0.32
4 (R4)	0.35	0.14	-0.11	-0.21	-0.29	-0.21	-0.14	-0.21	-1.01	-0.61	-0.45	-0.34
5 (R5)	0.28	0.14	-0.11	-0.26	-0.55	-0.65	-0.69	-1.15	-1.94	-1.33	-0.99	-0.44
6 (R6)	0.65	0.38	-0.03	-0.26	-0.57	-0.62	-0.61	-0.54	-0.45	-0.49	-1.17	-0.35
7 (R7)	0.41	0.41	0.11	-0.02	-0.34	-0.59	-0.72	-0.84	-0.98	-2.92	-2.24	-0.55
8 (R8)	0.65	0.63	0.32	0.18	-0.20	-0.47	-0.60	-0.64	-0.58	-0.45	-0.33	-0.49
9 (R9)	0.25	0.41	0.26	0.13	0.06	-0.14	-0.26	-0.40	-0.57	-1.06	-2.51	-0.91
10 (R10)	0.51	0.69	0.49	0.39	0.21	-0.14	-0.32	-0.46	-0.52	-0.48	-0.42	-0.48
11 (R11)	0.31	0.49	0.47	0.31	0.29	0.11	-0.05	-0.26	-0.43	-0.58	-0.64	-0.88
12 (R12)	-1.03	-0.91	-0.47	-0.23	-0.06	0.10	0.03	-0.20	-0.40	-0.63	-0.76	-0.99
13 (R13)	-1.26	-1.37	-1.12	-0.71	-0.38	-0.26	-0.04	0.09	0.12	-0.05	-0.26	-0.67
14 (R14)	-1.13	-1.16	-0.82	-0.75	-0.61	-0.53	-0.49	-0.39	-0.35	-0.50	-0.65	-0.62
15 (R15)	-1.24	-0.96	-0.40	-0.21	-0.03	0.25	0.26	0.23	0.23	-0.19	-0.28	-0.55
16 (R15)	-1.21	-1.00	-0.45	-0.39	-0.20	-0.02	-0.01	0.01	0.00	-0.29	-0.40	-0.78
17 (R16)	-1.10	-0.88	-0.50	-0.37	-0.15	0.13	0.06	0.06	0.05	0.10	-0.18	-0.55
18 (R17)	-1.15	-0.97	-0.62	-0.49	0.03	-0.15	-0.14	-0.14	-0.06	0.01	-0.36	-0.84
19 (R18)	-1.06	-0.85	-0.56	-0.49	-0.42	-0.54	-0.35	-0.48	-0.45	-0.45	-0.46	-0.52
20 (R18)	-1.00	-0.90	-0.72	-0.88	-1.28	-0.83	-0.70	-0.73	-0.60	-0.39	-0.43	-0.73
21 (R19)	-1.02	-0.97	-1.02	-1.01	-0.60	-0.70	-0.77	-0.69	-0.57	-0.36	-0.64	-0.98
22 (R19)	-1.00	-1.02	-1.12	-0.62	-0.58	-0.69	-0.72	-0.66	-0.53	-0.31	-0.27	-1.02
23 (R20)	-0.96	-0.95	-1.06	-1.41	-0.78	-0.44	-0.50	-0.49	-0.46	-0.32	-0.14	-0.64
24 (R20)	-0.89	-0.89	-0.88	-0.98	-1.08	-1.16	-0.76	-0.84	-0.89	-0.78	-0.55	-0.41

Таблица. Пиковые значения аэродинамических коэффициентов давления в контрольных точках на поверхности фасадов исследуемого объекта без учета окружающей застройки

№ точки (зоны)	1 (R1)	2 (R2)	3 (R3)	4 (R4)	5 (R5)	6 (R6)	7 (R7)	8 (R8)	9 (R9)	10 (R10)
C_{p+}	0.22	0.32	0.62	0.94	0.50	1.01	0.62	0.88	0.62	0.94
C_{p-}	-1.81	-1.55	-1.17	-1.34	-2.42	-1.57	-3.76	-0.99	-3.53	-1.10
№ точки (зоны)	11 (R11)	12 (R12)	13 (R13)	14 (R14)	15 (R15)	16 (R15)	17 (R16)	18 (R17)	19 (R18)	20 (R18)
C_{p+}	0.75	0.28	0.44	0.51	0.57	0.19	0.30	0.26	0.07	0.12
C_{p-}	-1.49	-1.27	-1.84	-1.79	-1.83	-1.71	-3.61	-1.96	-4.58	-3.02
№ точки (зоны)	21 (R19)	22 (R19)	23 (R20)	24 (R20)	25 (R21)	26 (R22)	27 (R22)	28 (R23)	29 (R24)	30 (R25)
C_{p+}	-0.05	0.69	0.04	0.10	0.22	0.22	0.12	0.06	0.09	0.19
C_{p-}	-1.56	-1.60	-1.93	-1.93	-1.52	-2.60	-3.07	-1.80	-3.27	-1.90

5. Сопоставление результатов математического и физического моделирования ветровых нагрузок

В разделе приведено сопоставление результатов средних (для характерных направлений ветра) и пиковых ветровых давлений, полученных по результатам математического и физического моделирования в дренажных (контрольных) точках.

Рассматривался только случай без учета окружающей застройки, как наиболее опасный, что подтверждено и математическим, и физическим моделированием.

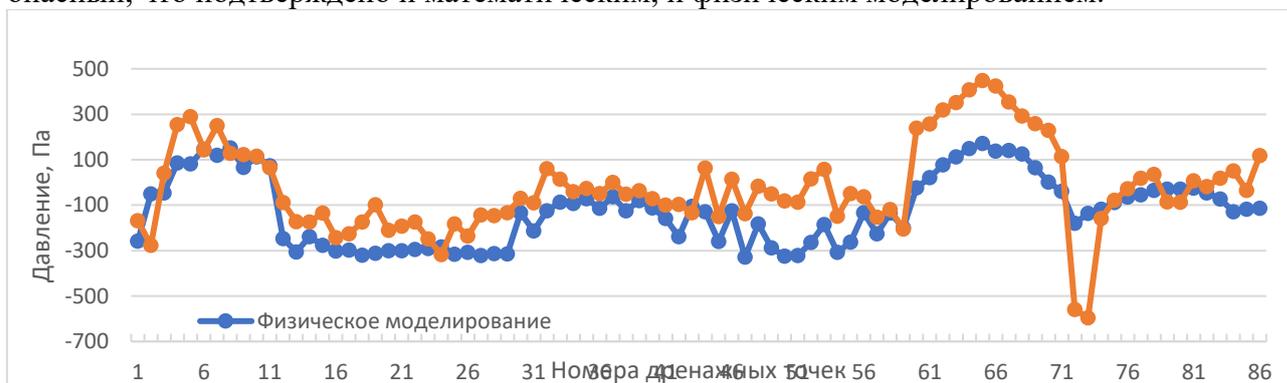


Рис. Сопоставление средних ветровых давлений, полученных по результатам математического и физического моделирования для направления ветра 0°. Случай без учета окружающей застройки



Рис. Сопоставление средних ветровых давлений, полученных по результатам математического и физического моделирования для направления ветра 315°. Случай без учета окружающей застройки

6. Определение снеговых нагрузок на основе математического моделирования

Для определения снеговых нагрузок используются данные СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» (с учетом изменений № 1-4) и результаты математического (численного) и физического моделирования снеговых нагрузок, представленные в разделе 8.2 настоящего отчета.

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:

$S_g = 1.45$ 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, результатам математического (численного) и физического моделирования снеговых нагрузок.

Для покрытий Объекта необходимо рассмотреть шесть вариантов нагружения с коэффициентом формы, определяемым в соответствии со схемами Б.1, Б.5, Б.6, Б.8, Б.10, Б.11 Приложения Б к СП и по результатам моделирования, представленным отчете о НИР. При этом для жёлоба на верхнем покрытии Объекта следует принять значение коэффициента формы μ : **1.25** для варианта 1 (равномерного распределения) и **3.0** для вариантов 2-6 (неравномерное распределение).

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.

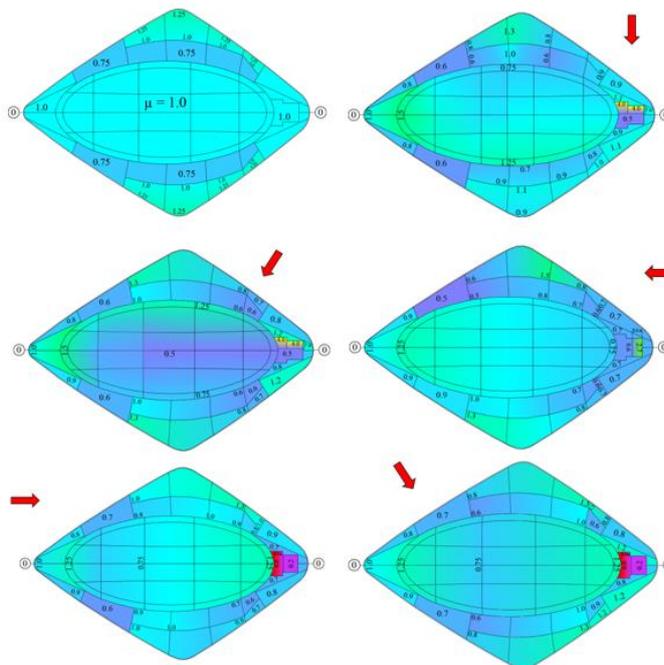


Рис. Различные схемы расчётного коэффициента формы μ для покрытия Объекта

Смоделированные коэффициенты формы для расчетных направлений ветра

При математическом (численном) моделировании, с применением численной методики и варьируя скорость ветра, было выполнено по три аэродинамических расчёта для восьми направлений ветра для Объекта (0° , 36° , 90° , 144° , 180° , 213° , 270° , 327°) с учётом и без учёта окружающей застройки. В соответствии с табл. 7.1 СП 131.13330.2020 *Строительная климатология*, средняя скорость ветра на высоте 10 м за зимний период для г. Москва составляет 2.6 м/с (V_{10}). Расчёты проводились для следующих скоростей:

Таблица.

Номер расчётного случая	Скорость на высоте 10 м, м/с	μ_0
1	1.0	1.0
2	3.0	1.0
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 6 ч, а время уноса осадков T_- – 240 ч.

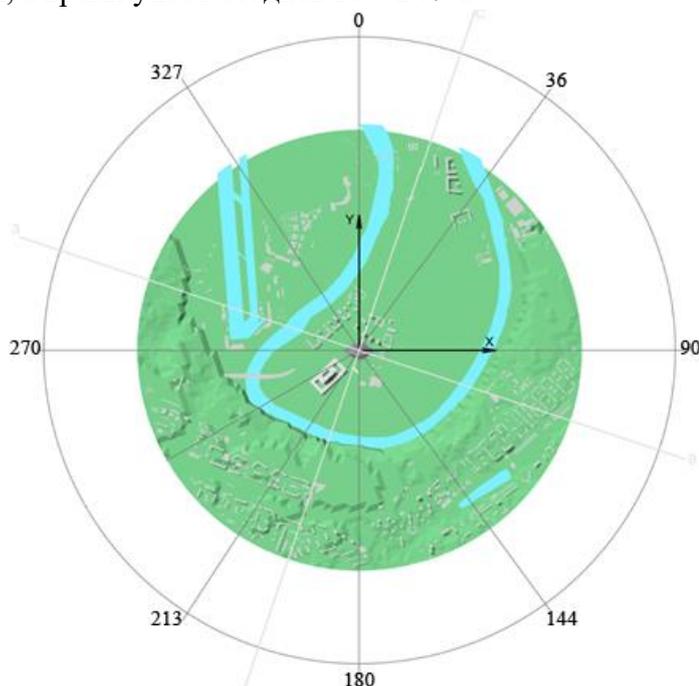


Рис. Расчетные направления ветрового потока для покрытий Объекта.

При физическом моделировании исследовались такие же направления ветра, как и для математического моделирования, а характерные скорости ветра, при которых анализировался перенос снега на модели, находились в диапазоне от 3.4 до 8 м/с. Моделирование снега выполнялось древесной мукой с размером частиц от 50 мкм до 250 мкм при влажности 3.5-4 %, которая смещается с гладкой крашеной поверхности при скорости ветра 3.4 м/с. В результате длительной экспозиции модели, покрытой тонким слоем древесной муки, в потоке воздуха со скоростью 6-7 м/с формируется картина снегопереноса. Анализ форм снеговых мешков выполнялся для зонирования кровли на элементарные примитивы, для которых выполняется стандартный расчет снеговой нагрузки.

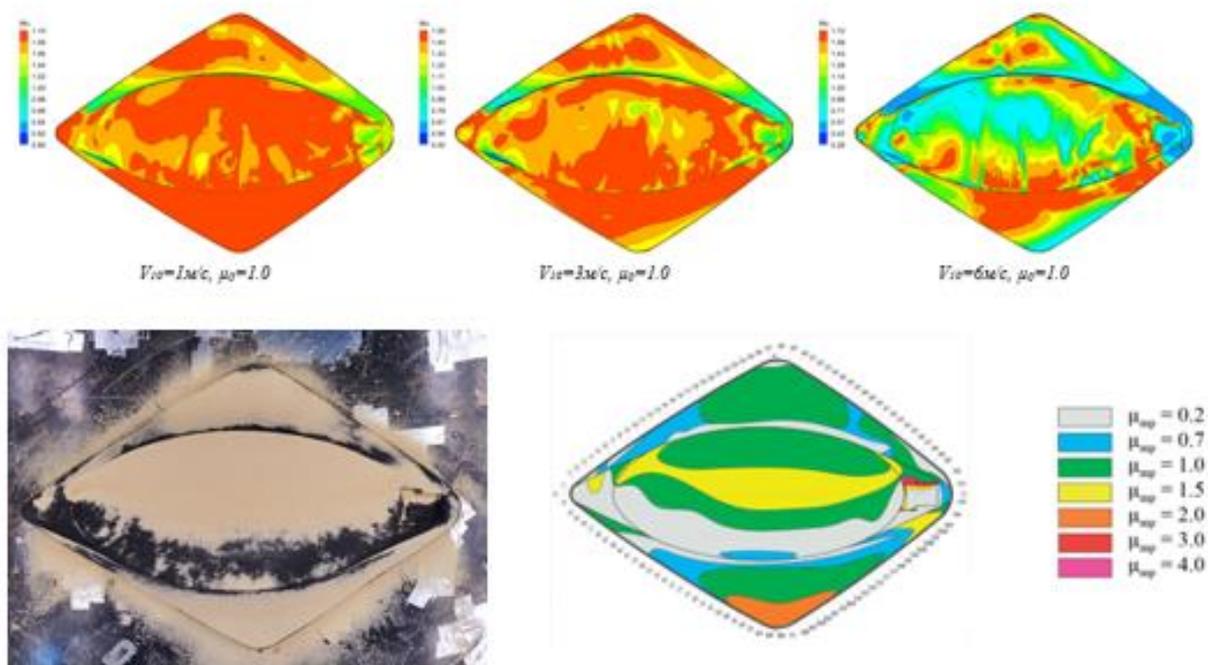


Рис. Математически моделируемый (*Сверху*), физически моделируемый (*Снизу слева*) коэффициент формы μ_{fm} для направления ветра 0° (без учёта окружающей застройки) Схема распределения снегоотложений по результатам физического моделирования для направления ветра 0° (*Снизу справа*)

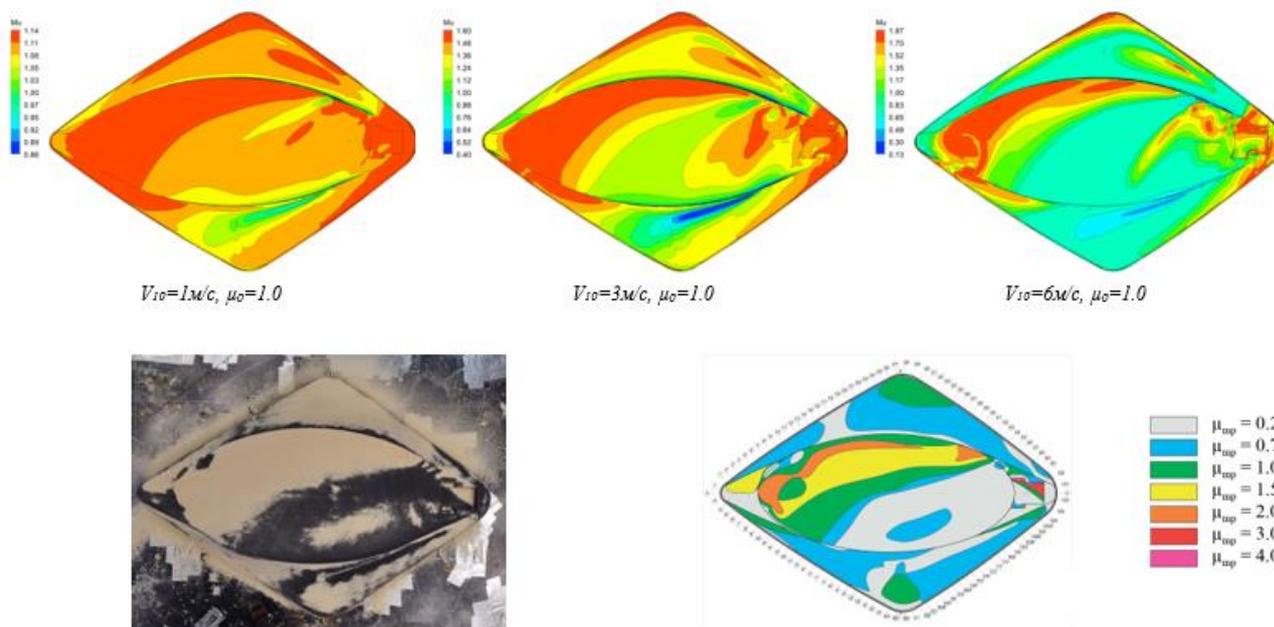


Рис. Математически моделируемый (*Сверху*), физически моделируемый (*Снизу слева*) коэффициент формы μ_{fm} для направления ветра 36° (без учёта окружающей застройки) Схема распределения снегоотложений по результатам физического моделирования для направления ветра 36° (*Снизу справа*)

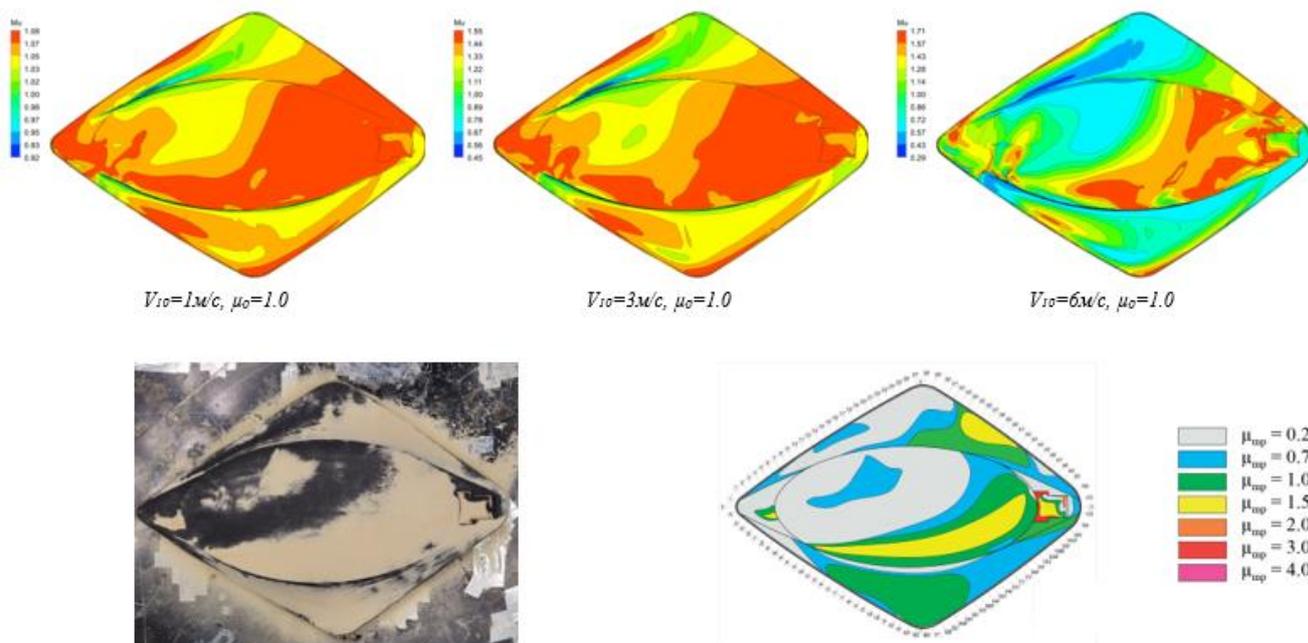


Рис. Математически моделируемый (Сверху), физически моделируемый (Снизу слева) коэффициент формы μ_{fm} для направления ветра 213° (без учёта окружающей застройки) Схема распределения снегоотложений по результатам физического моделирования для направления ветра 213° (Снизу справа)

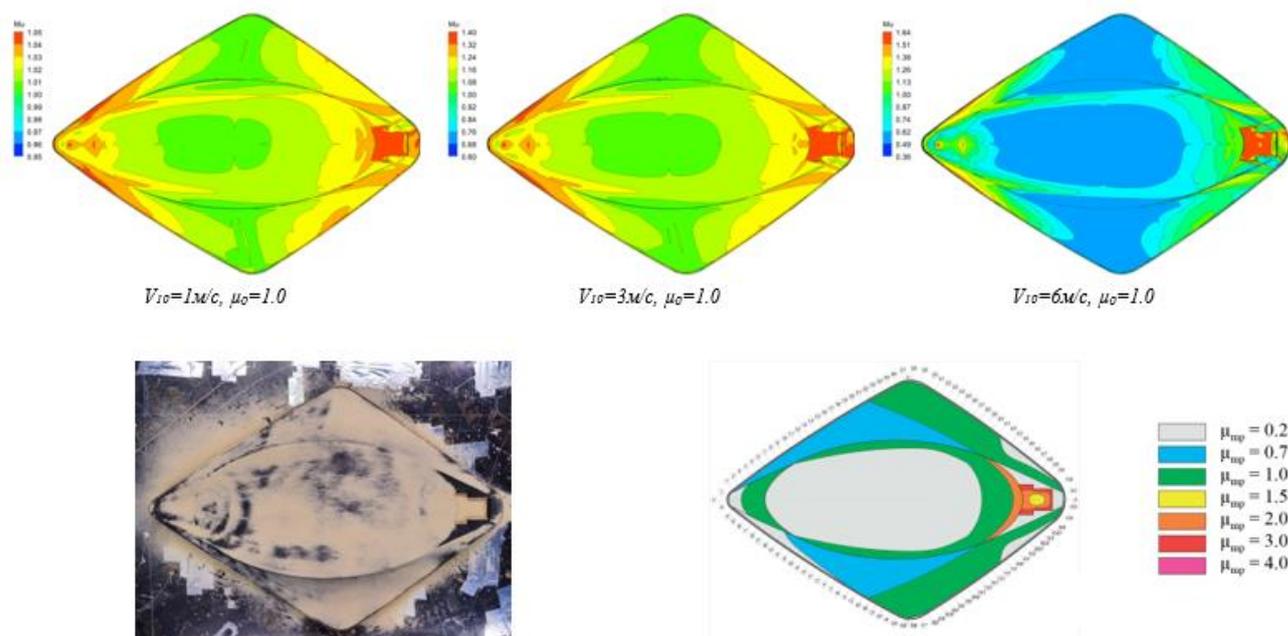


Рис. Математически моделируемый (Сверху), физически моделируемый (Снизу слева) коэффициент формы μ_{fm} для направления ветра 270° (без учёта окружающей застройки) Схема распределения снегоотложений по результатам физического моделирования для направления ветра 270° (Снизу справа)

Анализ математического (численного) моделирования коэффициента формы

Для составления схем расчётного коэффициента формы μ применяются как схемы Приложения Б к СП, так и результаты математического (численного) и физического моделирования. Также анализируется поведение ветрового потока над покрытиями исследуемого Объекта, для чего используются картины линий тока и векторных полей напряжения сдвига, которое играет определяющую роль в снегопереносе. В данном случае, к примеру, при моделировании без учёта окружающей застройки (*Модель 3*) на направлении 0° над кровлей был обнаружен вихрь, вызывающий снегоперенос на центральной части покрытия в противоположную обдуву сторону. Однако при моделировании с учётом окружающей застройки (*Модель 4*) этот вихрь уже не наблюдается, и распределение снега происходит согласно нормативным рекомендациям, вдоль тока ветра. Соответствующие картины напряжений сдвига и линий тока приведены на рис.

Также при составлении схем учитывался тот факт, что для некоторых областей покрытия угол наклона нормали к поверхности земли превышает 30° . В соответствии с Приложением Б к СП, в таком случае значений коэффициента формы μ должно определяться с помощью линейной интерполяции (для равномерно распределённой нагрузки, к примеру, от $\mu = 1$ при 30° до $\mu = 0$ при 60°). Полная картина углов наклона нормали представлена на рис.

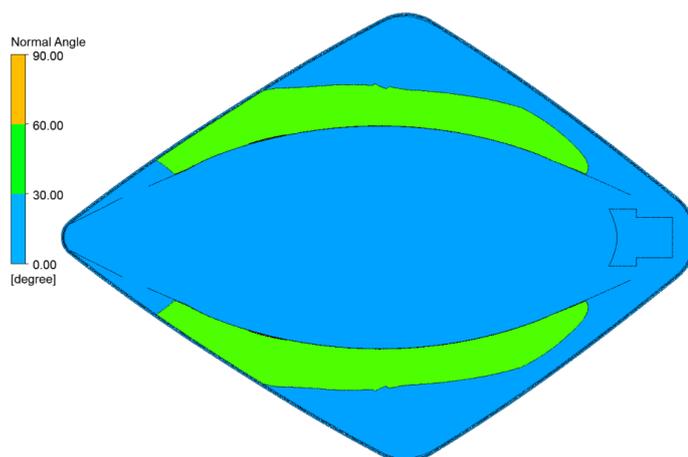


Рис. Углы наклона нормалей поверхности Объекта к поверхности земли

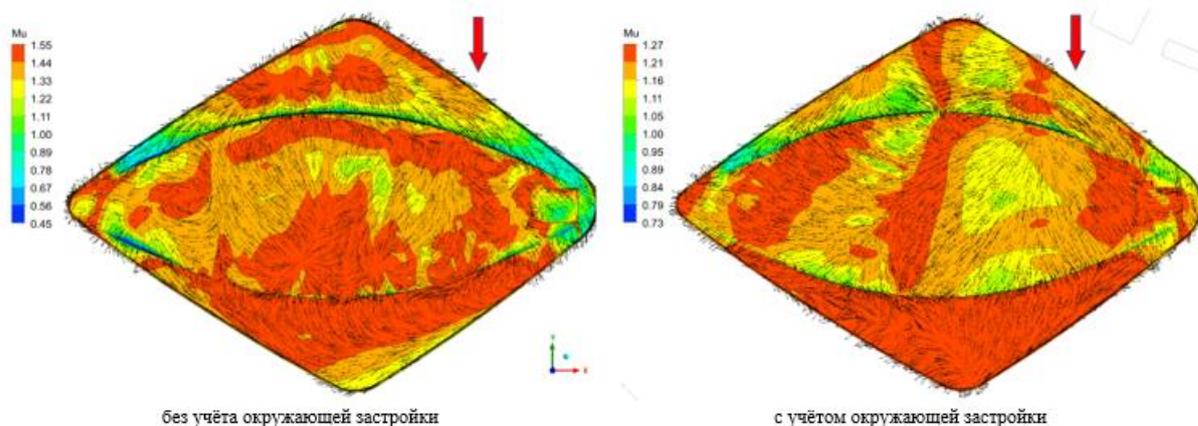


Рис. Векторное поле напряжений сдвига, нанесённое на смоделированный коэффициент формы μ , для направления ветра 0°

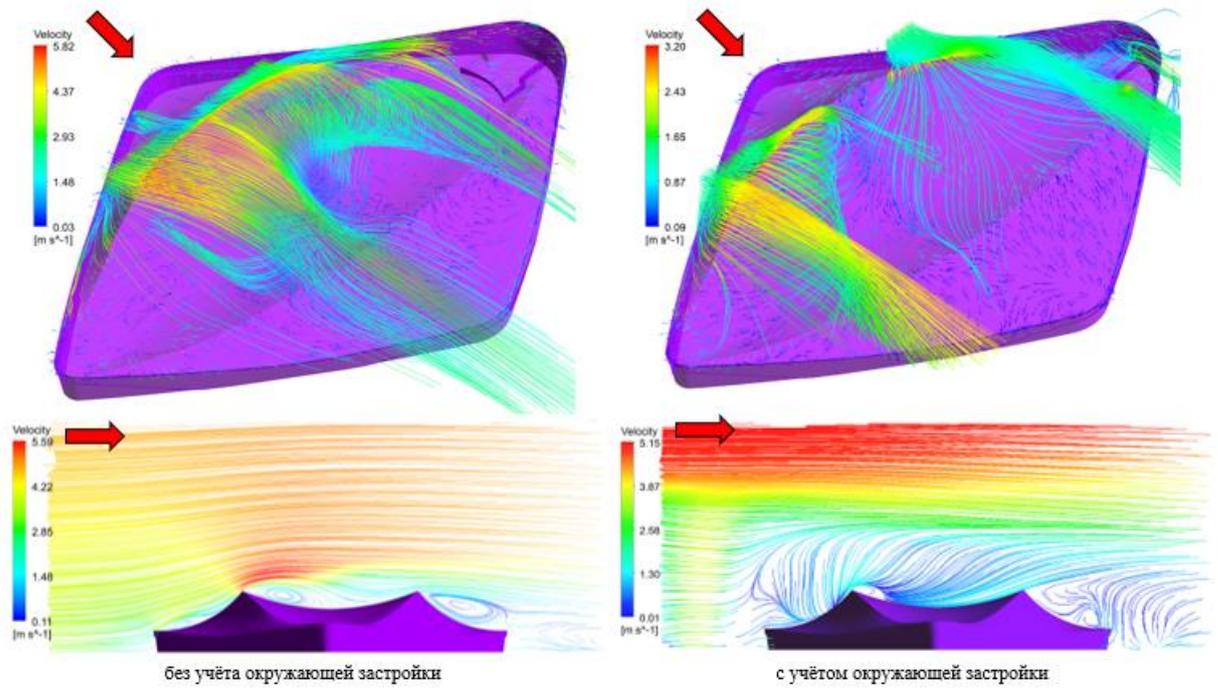


Рис. Линии тока ветра над Объектом и векторное поле напряжений сдвига для направления ветра 0°

Выводы и рекомендации

По результатам выполненного по для Объекта – «Серфинг-парк «Волна», расположенного по адресу: г. Москва, Мневниковская пойма, з/у № 11», можно сделать следующие выводы и рекомендации:

1. На основе анализа и обобщения исходных данных разработаны и верифицированы расчетные трехмерные математические (численные) модели ветровой аэродинамики Объекта с учетом и без учета окружающей застройки и рельефа местности.

2. На основе анализа и обобщения исходных данных разработаны физические (экспериментальные) модели Объекта в масштабе 1:250.

3. 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: 24 направления ветра без учёта окружающей застройки (*Модель 1*) и с учётом окружающей застройки (*Модель 2*); и моделирование снеговых нагрузок для 48 расчетных случаев: 8 направлений ветра при 3 различных скоростях ветра без учёта окружающей застройки (*Модель 3*) и с учётом окружающей застройки (*Модель 4*).

4. С использованием экспериментальной установки Уникальная научная установка «Большая Исследовательская Градиентная Аэродинамическая Труба (БИГАТ НИУ МГСУ)» было проведено физическое моделирование ветровых и снеговых нагрузок на Объект.

5. По результатам математического (численного) моделирования определены расчетные средние и пульсационные составляющие ветрового давления на несущие конструкции Объекта.

Выявлено, что случай без учета перспективной застройки для всех направлений ветра является более опасным для несущих конструкций, чем случай с учетом застройки.

В прочностных расчетах несущих конструкций **рекомендуется** рассмотреть наиболее опасные и характерные направления ветра 0° , 165° , 195° , 315° , 327° и 345° для случая без учета окружающей застройки.

6. По результатам математического (численного) моделирования определены пиковые ветровые давления на ограждающие конструкции Объекта.

7. По результатам физического (экспериментального) моделирования определены средние и пиковые аэродинамические коэффициенты в 86 контрольных точках Объекта.

Имея в виду допущения обоих подходов к моделированию ветровых нагрузок – математического (численного) и физического (экспериментального) – в расчетном обосновании механической безопасности несущих и фасадных конструкций объекта рекомендуется использовать ветровые нагрузки по принципу огибающей (выбор наиболее опасных случаев). При этом в расчетах несущих конструкций следует использовать результаты физического моделирования только для наиболее опасных направлений ветра, выявленных по результатам математического моделирования.

8. Даны рекомендации по назначению снеговой нагрузки на кровлю Объекта.