



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Национальный исследовательский

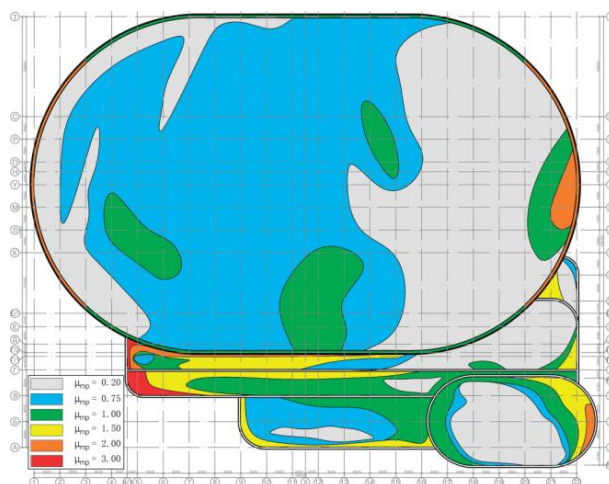
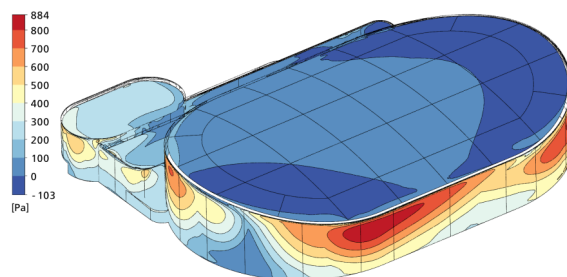
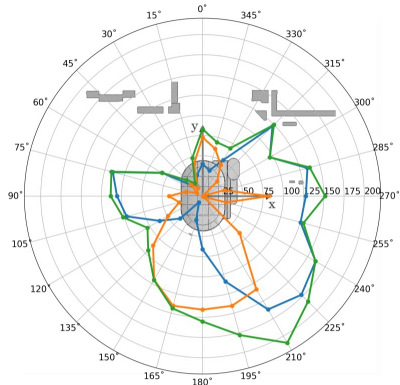
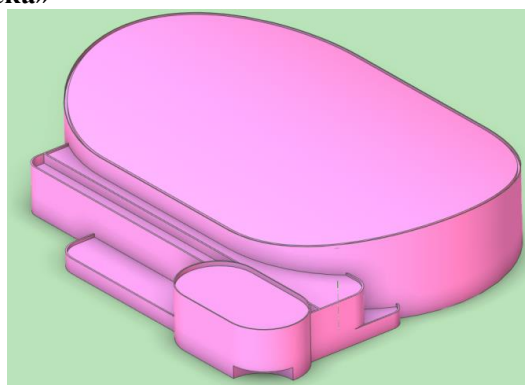
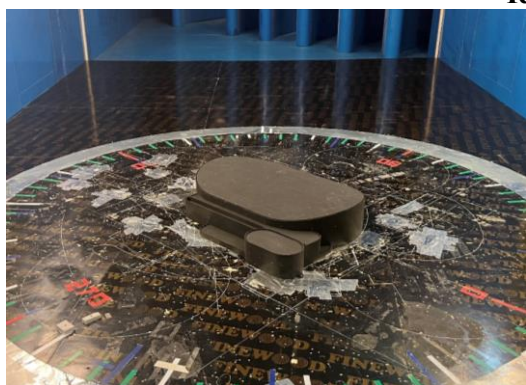
Московский государственный строительный университет

129337, Россия, Москва, Ярославское ш., д. 26, тел. +7 (495) 781-80-07, факс +7 (499) 183-44-38

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

ПО ТЕМЕ:

Определение аэродинамических коэффициентов и распределения снеговых нагрузок на
основе математического и физического моделирования, при проектировании объекта
«Крытый футбольный манеж по ул. Университетской Набережной Калининском районе г.
Челябинска»



1. Исходные данные. Постановка задач

Постановка задач комплексных аэродинамических исследований

В соответствии с техническим заданием ставятся и решаются следующие задачи:

1. Анализ и обобщение проектной документации Объекта, постановка задач расчетных исследований.
2. Проектирование и создание масштабной модели Объекта для последующего проведения физического (экспериментального) моделирования ветровых воздействий.
3. Разработка и верификация трехмерных аэродинамических расчетных моделей Объекта с учетом существующей окружающей застройки и различных направлений ветра.
4. Определение средних и пиковых значений аэродинамических коэффициентов давления в контрольных точках на основе физического (экспериментального) моделирования.
5. Выявление наиболее опасных и характерных направлений ветра на основе анализа суммарных ветровых нагрузок на несущие конструкции сооружений, полученных в результате математического (численного) моделирования.
6. Определение расчетных ветровых нагрузок на несущие конструкции для исследуемых направлений ветра по результатам математического и физического моделирования.
7. Определение распределения пиковых ветровых давлений на ограждающие (фасадные) конструкции Объекта по результатам математического и физического моделирования.
8. Проведение сопоставительного анализа результатов математического и физического моделирования ветровых нагрузок;
9. Проведение физического (экспериментального) моделирования снегопереноса на покрытии Объекта;
10. Проведение математического (численного) моделирования снегопереноса на покрытии Объекта;
11. Разработка на основе синтеза нормативных методик и результатов математического и физического моделирования рекомендаций по назначению снеговых нагрузок на покрытие Объекта в виде инженерных схем коэффициента μ

Площадка строительства, рельеф и застройка объекта

Проект «Крытый футбольный манеж по ул. Университетская набережная» расположен в Калининском районе на северо-западе г. Челябинска практически на пересечении ул. Молодогвардейцев и Университетской набережной. На рисунке представлен согласованный проект планировки территории в границах улиц Университетская набережная, Молодогвардейцев, береговой линии р. Миасс, ул. Украинского в Центральном и Калининском районах г. Челябинска.

С севера и востока от участка строительства расположена существующая окружающая застройка. С юга и запада от участка строительства расположены естественные водоемы (р. Миасс и пруд Коммунар) и лесопарковая зона (Челябинский бор).

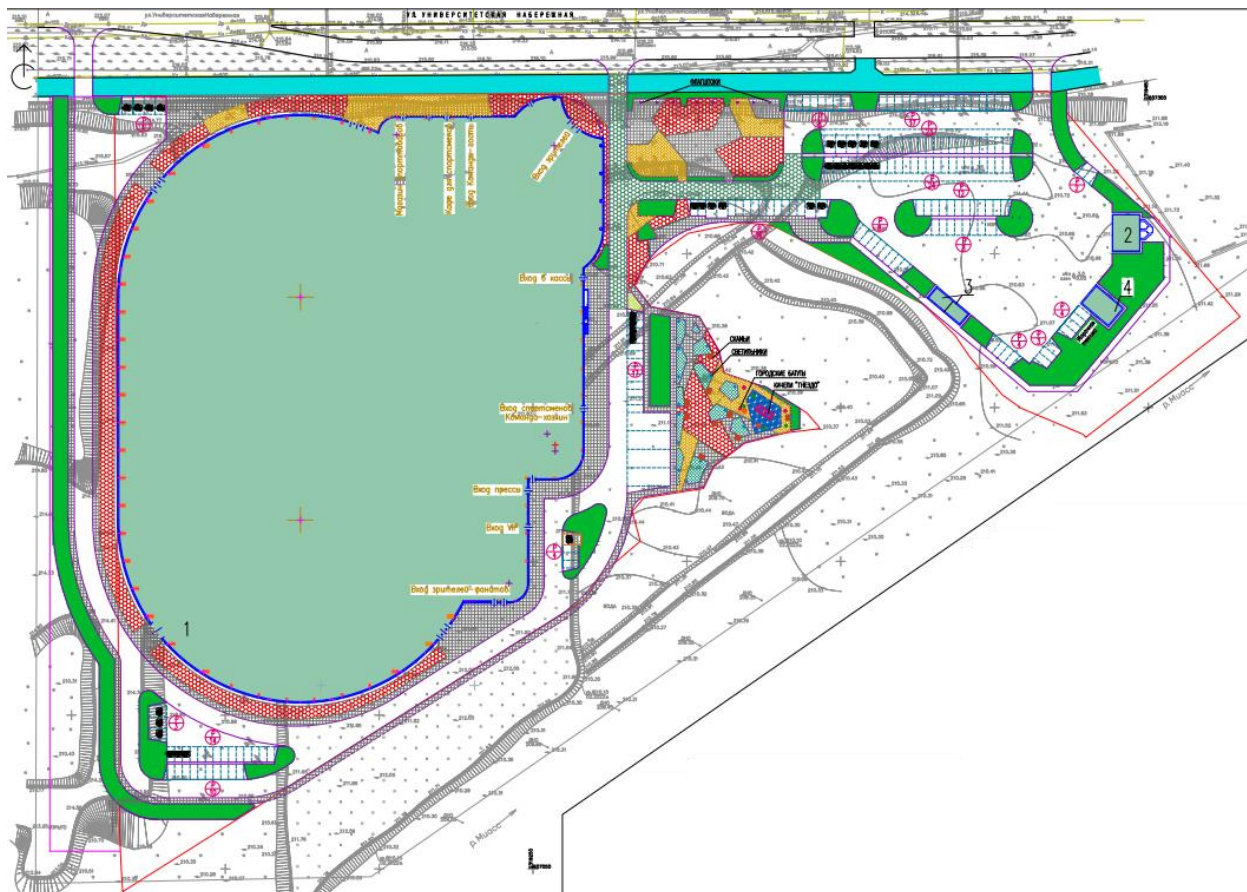


Рис. Схема планировочной организации земельного участка строительства



Рис. Участок строительства на карте Челябинска (красным) и значимая для аэродинамики застройка (синим), (источник: yandex.ru/maps)

Согласно СП 20.13330.2016 площадка строительства находится в **II ветровом районе** (нормативное значение ветрового давления $w_0 = 0.3 \text{ кПа}$) и **III снеговом районе** (нормативное значение веса снегового покрова $S_g = 1.2 \text{ кПа}$ согласно Приложению К к СП [2]). При определении ветровых нагрузок следует принять тип местности **В**, т.к. с севера и запада размещена жилая застройка, а с юга и запада сразу за озером и рекой располагаются лесные массивы.

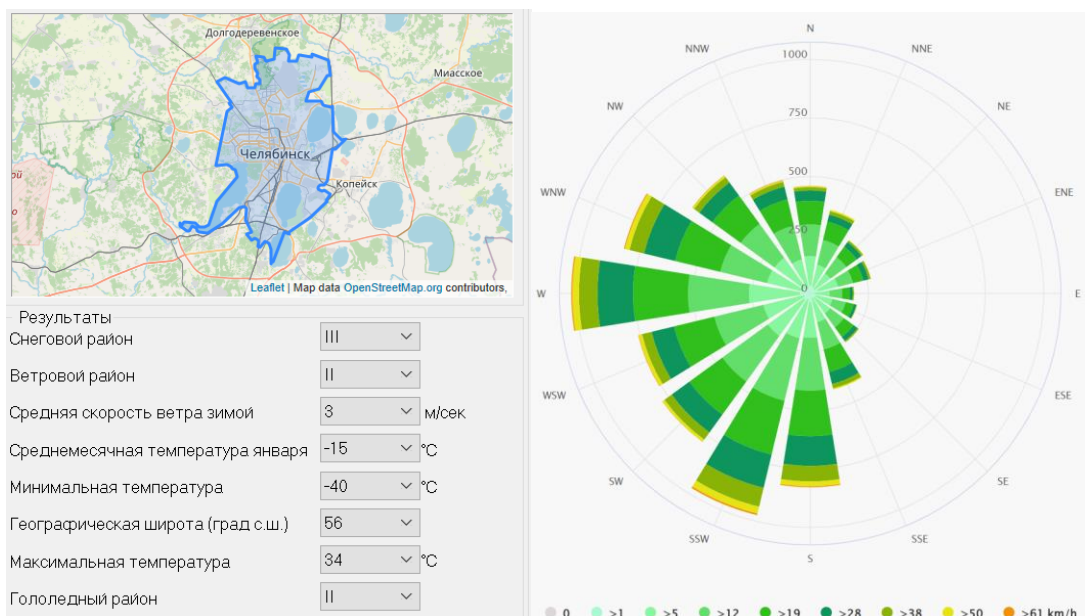


Рис. Климатические параметры местности и роза скоростей ветров для города Челябинск.

Краткая характеристика исследуемого Объекта

Согласно предоставленной заказчиком документации:

Проектируемый объект предназначен для проведения соревнований различного уровня, а также общефизической подготовки. Категория футбольного стадиона по стандарту РФС – 2. Категория спортивного сооружения по уровню спортивно-массовых мероприятий – В (Межрегиональные физкультурные мероприятия и спортивные мероприятия, а также физкультурные мероприятия и спортивные мероприятия субъекта Российской Федерации).

Крытый одноэтажный футбольный манеж расположен в осях 1-22/Д-У, имеет форму эллипса в плане с габаритными размерами 117х189 м. Конструкции крытого манежа – одноэтажный каркас, состоящий из одноэтажных однопролетных рам, расположенных вдоль цифровых осей, максимальный пролет рамных конструкций составляет 117м. Пролетными конструкциями рам являются стальные арки высотой 3,9 м с затяжками, опирающиеся шарнирно на монолитные железобетонные колонны (пилоны).

Конструкции административно-бытовой пристройки отделяются деформационным швом от конструкций крытого манежа. Деформационный шов выполняется за счет устройства парных колонн или за счет шарнирного опирания плиты перекрытия на монолитные железобетонные балки с применением фторопластовых пластин.

Крытый футбольный манеж имеет в плане живописную композицию, состоящую из нескольких разновысоких объёмов, каждый из которых имеет свою функцию: округлый объём зала с универсальным манежем, округлый объём вестибюля главного входа и объёмы с закругленными углами фойе, магазина, помещений спортсменов. Здание включает в себя один подземный этаж, три наземных этажа, кроме того, проектом предусматривается устройство технического подполья под 1 этажом и технического пространства над 3 этажом.

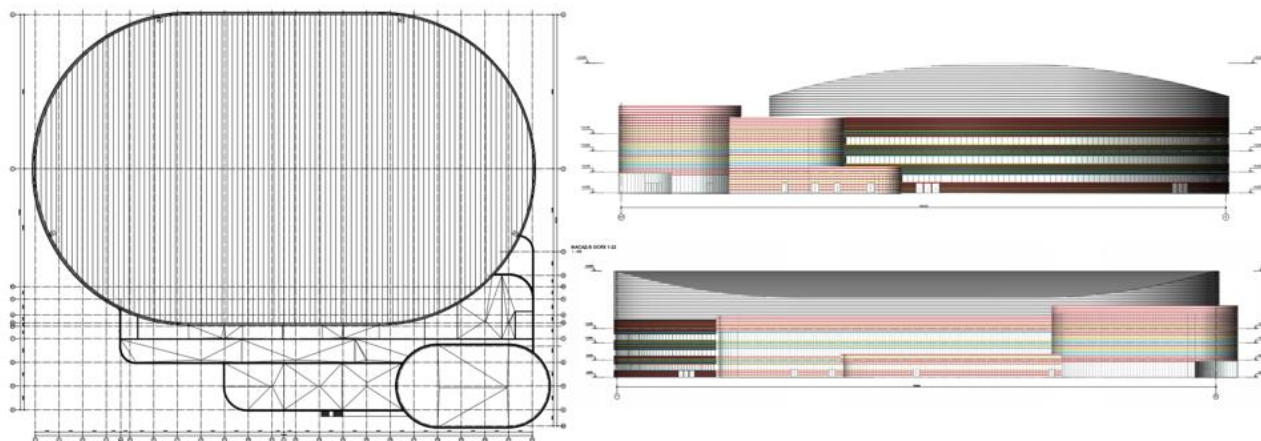


Рис. План кровли и фасады Объекта

2. Разработка физических и математических моделей

Для физического (экспериментального) моделирования аэродинамики объекта был спроектирован и изготовлен масштабный макет объекта, на поверхности которого размещались датчики давления.

Для математического (численного) моделирования аэродинамики объекта были разработаны и верифицированы CFD-модели для определения ветровых нагрузок на несущие и ограждающие (фасадные) конструкции Объекта и снеговых нагрузок на конструкции покрытия Объекта с учётом окружающей застройки.

Проектирование и создание физической модели

Для физического (экспериментального) моделирования Заказчиком была предоставлена и согласована с Исполнителем геометрическая модель исследуемого объекта. Учитывая размеры рабочей части аэродинамической трубы, был выбран максимально возможный из условий загромождения потока масштаб макета 1:200.

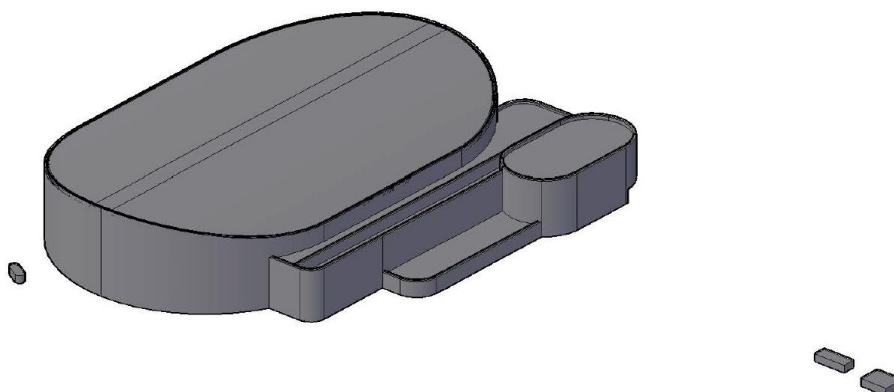


Рис. Геометрическая модель исследуемого объекта

По согласованной модели Заказчиком спроектирована и изготовлена из листового пенополистирола физическая модель Объекта. Учитывая отсутствие у реального объекта существенной шероховатости поверхности, влияющей на характер обтекания, а также с учетом необходимости моделирования процессов снеготранспорта, модель выполнена гладкой.

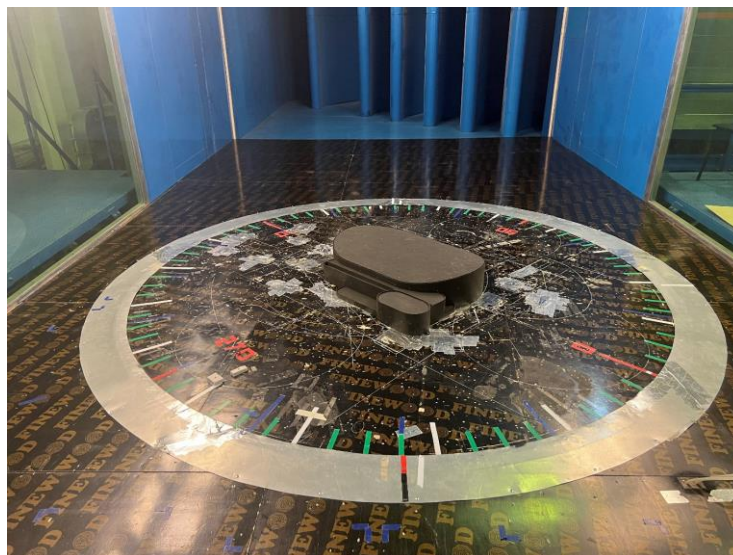


Рис. Модель исследуемого объекта в аэродинамической трубе

Внутримодельное пространство выполнено с учетом необходимости размещения 90 контрольных точек измерения давления на поверхности модели

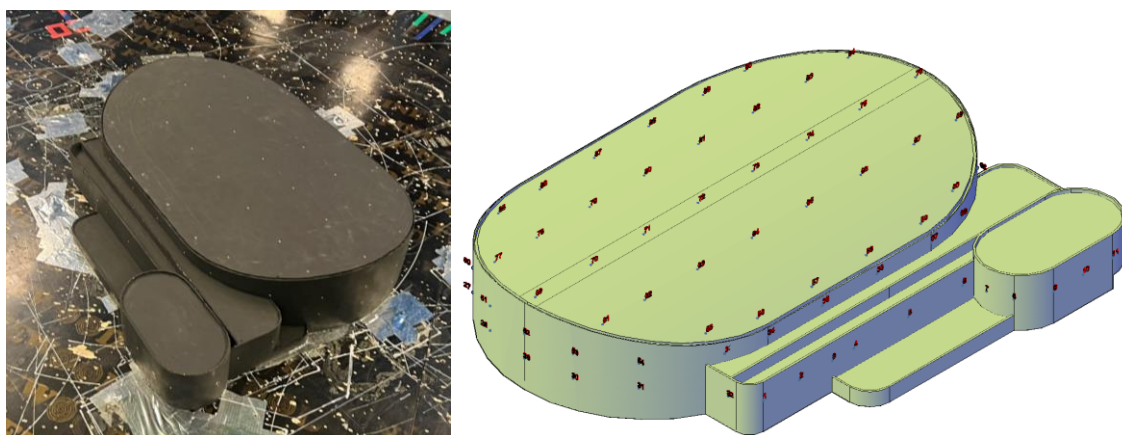


Рис. Контрольные точки на поверхности изготовленной модели

Подготовка аэродинамической трубы

На расстоянии 0,5 м от края установленной в рабочей зоне модели установлена трубка Пито-Прандтля, представляющая собой устройство для определения полного и статического давлений в потоке при проведении экспериментов. Канал, соответствующий статическому давлению, подключен к системе герметизированных коллекторов таким образом, что обеспечивалась подача статического давления потока на все используемые в эксперименте датчики давления. Канал полного давления подключен к дифференциальному цифровому манометру, который служит для определения скорости потока воздуха. Это обеспечивало дополнительную проверку работы аэродинамической трубы и повышению достоверности проведенного эксперимента.

Моделирование приземного слоя атмосферы выполнено с использованием генераторов вихрей и элементов шероховатости на нижней стенке аэродинамической трубы.

Калибровка датчиков давления

Калибровка выполнялась стандартным методом путем проведения "эталонных" экспериментов в аэродинамической установке AeroLab. К каждому датчику подводится одна силиконовая трубка, которая ведет к гребенке, подключенной одним из разъемов к шприцу, подающему давление. Также к одному разьему гребенки при помощи силиконовой трубки подсоединена герметичная емкость, позволяющая выравнивать и удерживать давление в гребенке на протяжении продолжительного времени. Далее при помощи шприца в системе нагнетается давление определенной величины (определяется эталонным измерительным прибором) и считываются показания калибруемых датчиков давления.

Эталонным прибором является дифференциальный цифровой манометр ЭКО-ИНТЕХ ДМЦ-01М. Предел основной допускаемой абсолютной погрешности измерений, не более $\pm(1+0,005\Delta P)$ Па. В результате калибровки были получена градуировочная зависимость для 90 датчиков, используемых при проведении экспериментальных исследований. Для каждого датчика получена градуировочная зависимость между приложенным давлением и измеренным напряжением.

Для определения абсолютной погрешности измерений выполнена нормализация сигнала по градуировочной зависимости и выполнено сравнение значений восстановленного сигнала с величиной нагрузки, поданной от источника опорного давления. Результат сравнения для представительного набора датчиков представлен на графике. Из графика видно, что во всем диапазоне изменения давления в эксперименте, отклонение вычисленной амплитуды давления не превышает 4Па.

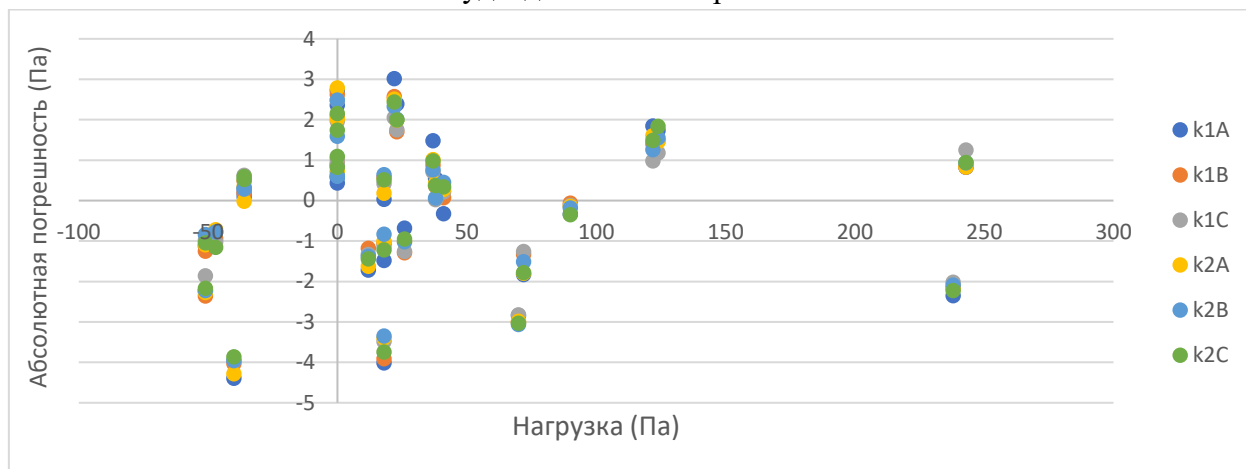


Рис. Оценка абсолютной погрешности измерений

Физическое моделирование ветровых нагрузок проводилось для 24-х направлений ветра (углы атаки ветра от 0° до 345° с шагом 15°).

Физическое моделирование снеговых нагрузок проводилось для 8-и направлений ветра (углы атаки ветра от 0° до 345° с шагом 45°).

Схема исследуемых направлений ветра представлена на рисунке

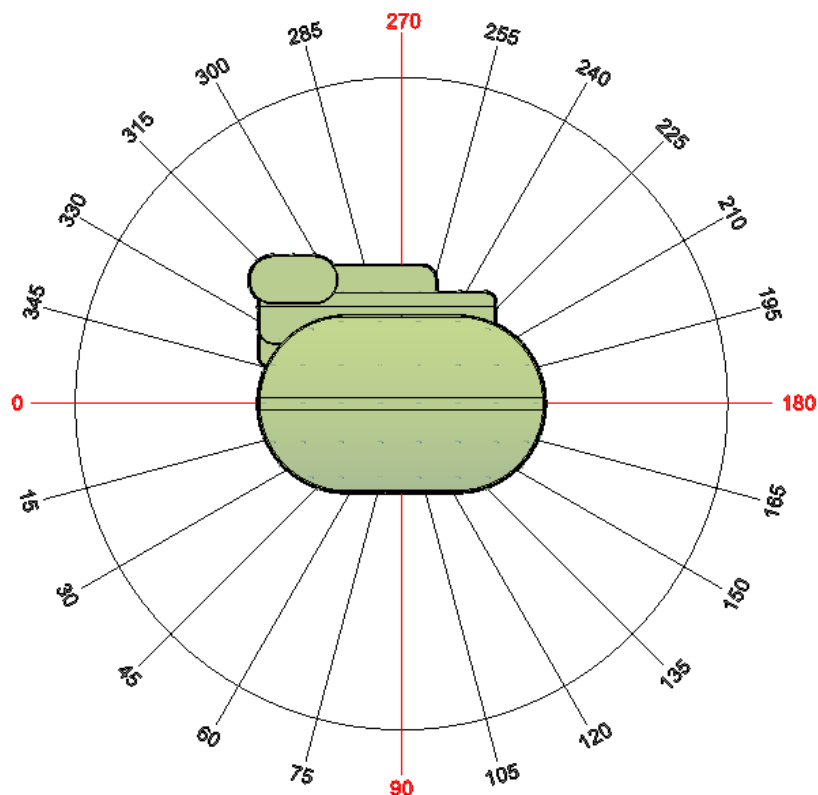


Рис. Схема исследуемых направлений ветра для математического и физического моделирования

Геометрическая модель для численных исследований

Практическая подготовка расчетных моделей начинается с создания геометрической модели Объекта с учетом существующей окружающей застройки в радиусе 750 м. Геометрия Объекта выполнена согласно предоставленной заказчиком модели, а существующая окружающая застройка – на основе открытых GIS-данных. Объемная геометрическая модель получается путем «вычитания» Объекта и окружающей застройки из цилиндра радиусом 3км и высотой 500м. Геометрическая модель разрабатывалась в модуле ANSYS SpaceClaim.

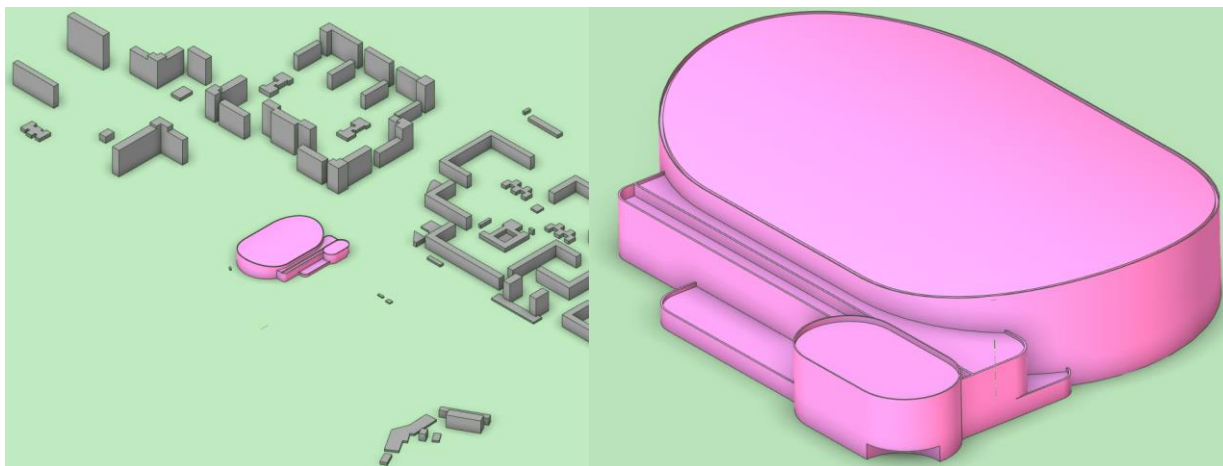


Рис. Геометрическая модель Объекта и окружающей застройки. Общий вид

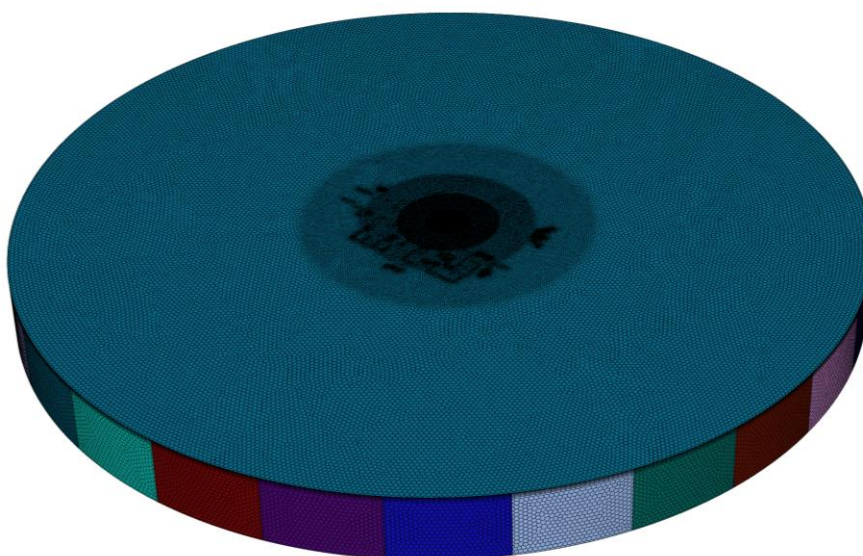


Рис. Конечнообъемная сетка. Вид снизу

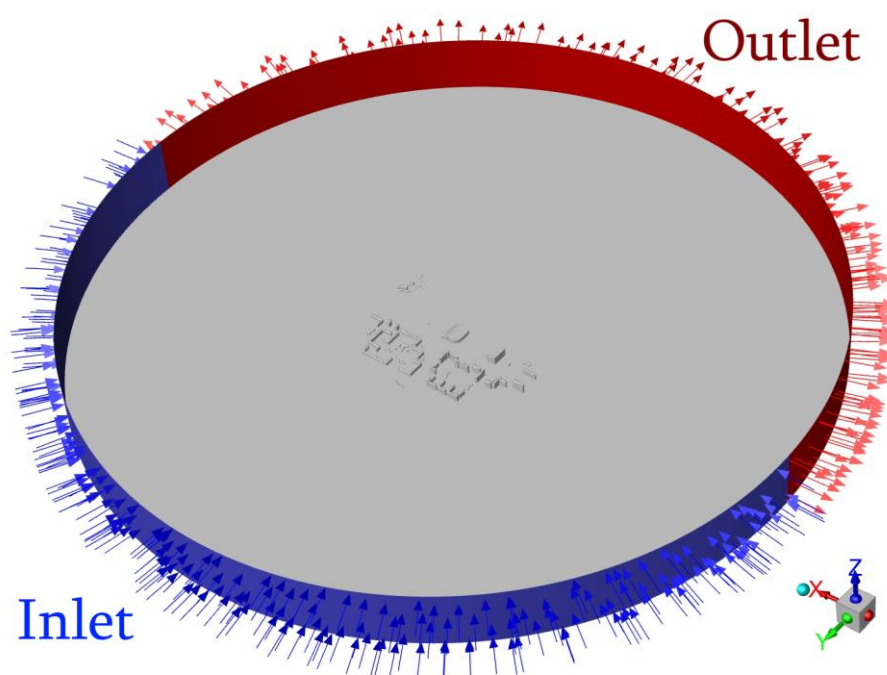


Рис. Расчетная область *Модели* (ANSYS Fluent)
с обозначенными граничными условиями

Результаты математического моделирования

Компоненты для сбора аэродинамических нагрузок (см. рис) представляют из себя наборы поверхностей, по которым производится осреднение давлений.

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.

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;

- среднее ветровое давление (P , Па) для соответствующих компонент в табличном виде. 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).

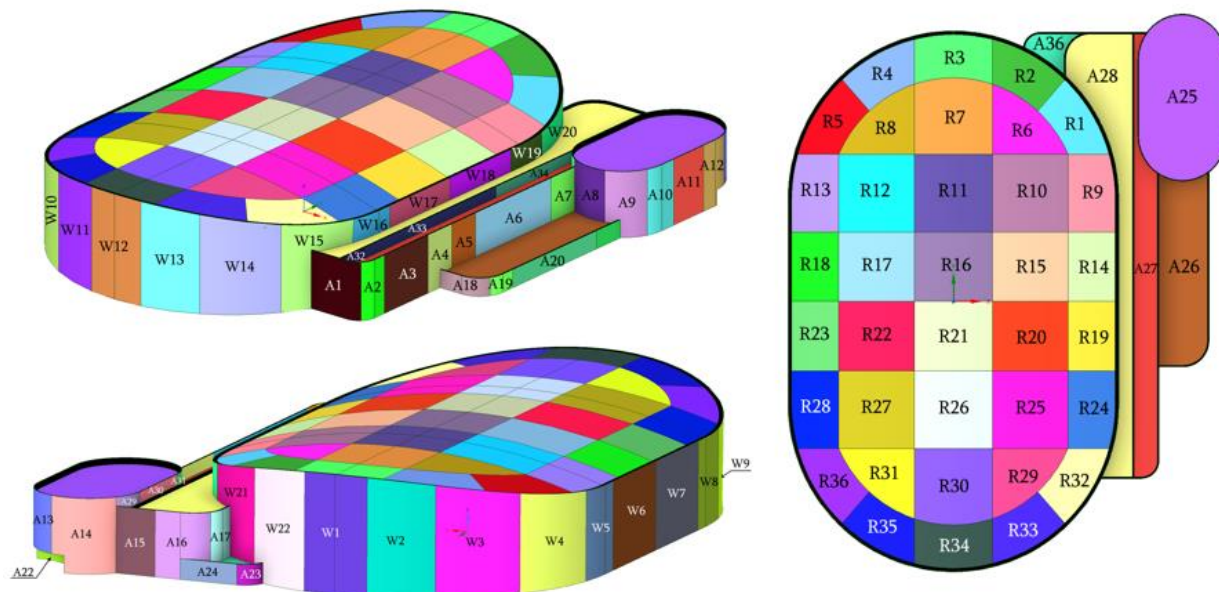
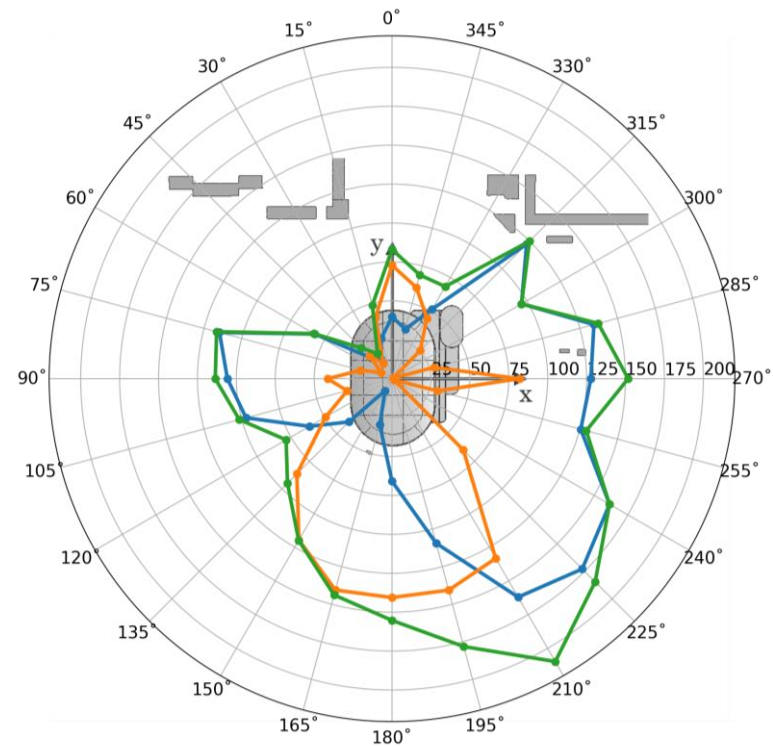


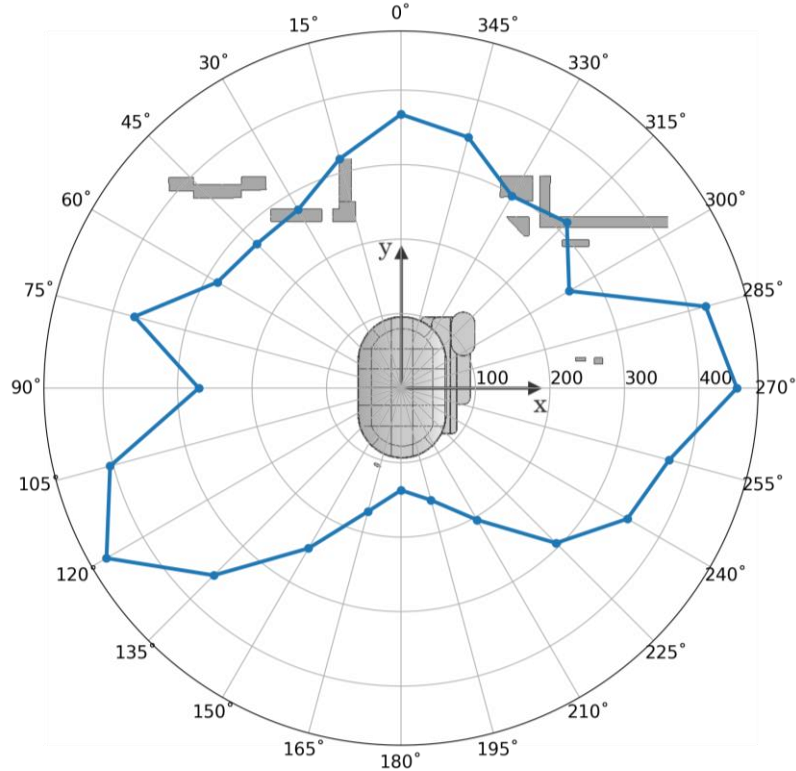
Рис Схема нумерации характерных зон (фасады)

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

Угол, °	Весь объект			Кровля
	F_x , тс	F_y , тс	F_R , тс	F_z , тс
0	-40	-73	83	368
15	27	-41	49	319
30	15	-11	19	276
45	19	-20	28	274
60	57	-8	58	285
75	115	-21	117	371
90	106	-41	114	272
105	97	-30	102	404
120	61	49	79	457
135	39	86	95	355
150	9	120	120	248
165	-30	140.56	144	171
180	-66	140.59	155	137
195	-109	140.62	178	156
210	-162	133	210	204
225	-173	65	185	294
240	-161	2	161	351
255	-126	-30	129	373
270	-128	-82	152	451
285	-134	28	137	423
300	-96	1	96	261
315	-122	-26	125	315
330	-52	-45	68	298
345	-33	-61	69	349



— FX [ts] — FY [ts] — FR [ts]
Весь объект



— FZ [ts]
Кровля

Рис. Суммарные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y), векторная сумма нагрузки (F_R) и суммарная вертикальная сила (F_z) в зависимости от направления ветра, тс (значения приведены по модулю)

Таблица Средняя составляющая ветрового давления (P , Па) для компонент *Объекта*. Угол атаки ветра 75°

Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P
A1	-51.3	A15	27.3	A29	87.1	R3	-206.2	R17	-155.3	R31	-104.4	W9	-75
A2	-83.3	A16	-28.7	A30	0.7	R4	-230.7	R18	-145	R32	-85.8	W10	-171.9
A3	-62.3	A17	19.1	A31	-141.2	R5	-254.3	R19	-112.8	R33	-119.9	W11	-226.8
A4	-63.7	A18	-16.8	A32	-88.3	R6	-205.2	R20	-199.7	R34	-124	W12	-224.9
A5	-83.8	A19	-44.3	A33	-93.5	R7	-225.8	R21	-196.7	R35	-88.6	W13	-177.7
A6	-99	A20	-63.8	A34	-91.3	R8	-205.6	R22	-128.6	R36	-60.5	W14	-103.8
A7	-94.9	A21	-132.3	A35	65.1	R9	-135.5	R23	-103.9	W1	-277.5	W15	-75.9
A8	-127.6	A22	-95.2	A36	-10.6	R10	-217.8	R24	-95.5	W2	-251.3	W16	-91.9
A9	-179	A23	-50.7	A37	-75	R11	-233.5	R25	-170.6	W3	-38.3	W17	-97
A10	-126.7	A24	-50.3	A38	-92.9	R12	-183.1	R26	-167.8	W4	227.8	W18	-123.5
A11	-95.9	A25	-33.6	A39	-114.9	R13	-201.5	R27	-110	W5	309.5	W19	-181.6
A12	-91.5	A26	-98.5	A40	69.6	R14	-126.8	R28	-76	W6	277.4	W20	-124.6
A13	-133.2	A27	-94.2	R1	-132.9	R15	-216.9	R29	-145	W7	194.4	W21	-86.7
A14	-117.7	A28	-107.8	R2	-166.6	R16	-221	R30	-140.7	W8	66.6	W22	-144.3

Таблица Средняя составляющая ветрового давления (P , Па) для компонент *Объекта*. Угол атаки ветра 195°

Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P
A1	168.8	A15	-2.6	A29	-20.3	R3	-35.5	R17	-14.7	R31	-117.5	W9	-217.1
A2	-205	A16	-29.7	A30	-48.5	R4	-101.7	R18	-13.9	R32	-314.8	W10	-95.7
A3	-6.7	A17	38.6	A31	-67.6	R5	-88.1	R19	-22.9	R33	-455.8	W11	129.5
A4	26.6	A18	80.7	A32	-222.1	R6	-8.4	R20	-16.6	R34	-446	W12	294.8
A5	35.4	A19	-6.4	A33	-19.8	R7	-24.3	R21	-16.7	R35	-322.4	W13	332.6
A6	84.2	A20	74.8	A34	-42.8	R8	-49	R22	-19.3	R36	-162.4	W14	237.1
A7	115.6	A21	111.7	A35	-21.9	R9	-21.1	R23	-23.2	W1	-170	W15	66.4
A8	133	A22	73.7	A36	37.2	R10	-11.5	R24	-109.5	W2	-353.1	W16	-99
A9	119.8	A23	-7.2	A37	-210.6	R11	-16	R25	-49.7	W3	-356.1	W17	21.4
A10	-19.4	A24	-3.7	A38	-39	R12	-25.3	R26	-34.6	W4	-228.3	W18	28.8
A11	38.6	A25	-45.8	A39	-12.5	R13	-35	R27	-46	W5	-109.2	W19	-56.7
A12	29.6	A26	75.2	A40	-18.3	R14	-8	R28	-67.5	W6	-33.6	W20	-140.1
A13	61	A27	-42.5	R1	-18.9	R15	-9.6	R29	-132.9	W7	-44.9	W21	-3.5
A14	42.4	A28	-41.5	R2	15.6	R16	-12.8	R30	-123.1	W8	-143.1	W22	2

Таблица. Наибольшие по модулю положительные и отрицательные средние ветровые давления для компонент покрытия *Объекта* среди всех исследуемых углов атаки ветра

Компонента	$\max(P)_{\alpha_j}$	$\min(P)_{\alpha_j}$	Компонента	$\max(P)_{\alpha_j}$	$\min(P)_{\alpha_j}$
R1	16.7	-256.9	R19	-22.9	-213.3
R2	27.1	-389.4	R20	-10.9	-254.1
R3	-28	-426	R21	-5.4	-280.4
R4	-44.5	-414	R22	-10	-228.4
R5	-27.8	-257.3	R23	-20	-344.5
R6	9.1	-211.1	R24	-73.1	-191.3
R7	-10.1	-225.8	R25	-49.7	-250.5
R8	-34.9	-213.7	R26	-26.8	-291.7
R9	6.9	-193.6	R27	-37.9	-249.7
R10	7.2	-217.8	R28	-67.5	-358.7
R11	-0.5	-244.6	R29	-78.9	-250.3
R12	-14.9	-231.2	R30	-79.6	-291.6
R13	-35	-278.4	R31	-83.6	-270.9
R14	5.3	-215.8	R32	-66.4	-384.3
R15	3.9	-238.5	R33	-65.4	-470
R16	1	-270.6	R34	-62.9	-468.1
R17	-5.4	-238.2	R35	-61.4	-514.6
R18	-13.2	-331.6	R36	-60.5	-478.7

Результаты физического моделирования

Для удобства использования ветровые нагрузки на несущие конструкции по результатам физического моделирования приведены по той же номенклатуре, что и результаты математического моделирования. Были определены аэродинамические коэффициенты в дренажных точках для 24-х направлений ветра.

Соответствие (неполное) размещения дренажных точек и компонент сбора нагрузки по признаку их расположения на модели Объекта приведено в таблице.

В пункте представлены средние ветровые давления (P , Па) для соответствующих компонент в табличном виде. 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).

Таблица. Соответствие нумерации компонент и дренажных точек

Компонента	Точки	Компонента	Точки	Компонента	Точки
A1	32	A34	-	R27	79
A2	1	A35	-	R28	86
A3	2	A36	-	R29	62
A4	3	A37	-	R30	70
A5	4	A38	-	R31	78
A6	5	A39	-	R32	55
A7	6	A40	-	R33	61
A8	7	R1	60	R34	69
A9	8	R2	68	R35	77
A10	9	R3	76	R36	85
A11	10	R4	84	W1	18, 41
A12	11	R5	90	W2	19, 42
A13	12	R6	67	W3	20, 43
A14	13	R7	75	W4	21, 44
A15	14	R8	83	W5	22, 45
A16	15	R9	59	W6	23, 46
A17	16	R10	66	W7	24, 47
A18	-	R11	74	W8	25, 48
A19	-	R12	82	W9	26, 49
A20	-	R13	89	W10	27, 50
A21	-	R14	-	W11	28, 51
A22	-	R15	65	W12	29, 52
A23	-	R16	73	W13	30, 53
A24	-	R17	81	W14	31, 54
A25	-	R18	88	W15	33
A26	-	R19	57	W16	34
A27	-	R20	64	W17	35
A28	-	R21	72	W18	36
A29	-	R22	80	W19	37
A30	-	R23	87	W20	38
A31	-	R24	56	W21	39
A32	-	R25	63	W22	17, 40
A33	-	R26	71		

Таблица Средняя составляющая ветрового давления (P , Па) для компонент *Объекта*. Угол атаки ветра 75°

Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P
A1	-86.5	A15	61.9	A29	-	R3	-320.6	R17	-349.2	R31	-366.2	W9	-22.3
A2	-58.9	A16	-31.9	A30	-	R4	-474.8	R18	-515	R32	-173	W10	-316.8
A3	-42.4	A17	7.7	A31	-	R5	-490.5	R19	-105.5	R33	-171.7	W11	-336.5
A4	-46.8	A18	-	A32	-	R6	-306.1	R20	-343.1	R34	-296.9	W12	-215.1
A5	-44.5	A19	-	A33	-	R7	-414.8	R21	-456	R35	-191.6	W13	-139.6
A6	-49.7	A20	-	A34	-	R8	-344.6	R22	-437.5	R36	-301.5	W14	-130
A7	-53.1	A21	-	A35	-	R9	-169.5	R23	-424.5	W1	-295	W15	-107.9
A8	-47.3	A22	-	A36	-	R10	-333.4	R24	-134.2	W2	-195.6	W16	-83.4
A9	-159.1	A23	-	A37	-	R11	-446.9	R25	-340	W3	11.9	W17	-77.3
A10	-96.2	A24	-	A38	-	R12	-332.4	R26	-357.2	W4	174	W18	-85.6
A11	-76	A25	-	A39	-	R13	-435.6	R27	-436.9	W5	156.6	W19	-130.1
A12	-91.4	A26	-	A40	-	R14	-	R28	-385.4	W6	156.8	W20	-104.8
A13	-82.9	A27	-	R1	-169.5	R15	-326	R29	-246.3	W7	152.5	W21	-282.1
A14	-356.3	A28	-	R2	-185.1	R16	-357.8	R30	-338.1	W8	95.3	W22	-112.4

Таблица Средняя составляющая ветрового давления (P , Па) для компонент *Объекта*. Угол атаки ветра 195°

Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P	Комп.	P
A1	96.1	A15	-66.3	A29	-	R3	-196.7	R17	-125	R31	-303	W9	-366.8
A2	-285.3	A16	-84.8	A30	-	R4	-322.4	R18	-151.1	R32	-506.5	W10	-123.9
A3	-67	A17	-92	A31	-	R5	-231.1	R19	-114.4	R33	-598.1	W11	67.7
A4	-54.7	A18	-	A32	-	R6	-172.1	R20	-131.7	R34	-601.3	W12	196.6
A5	-29.9	A19	-	A33	-	R7	-204.3	R21	-91.8	R35	-569.7	W13	251.6
A6	27.2	A20	-	A34	-	R8	-204.5	R22	-141.9	R36	-267.3	W14	169.8
A7	3.7	A21	-	A35	-	R9	-176.1	R23	-173.3	W1	-139.6	W15	-410.6
A8	84.1	A22	-	A36	-	R10	-156.1	R24	-239.2	W2	-212.7	W16	-215.5
A9	-26.1	A23	-	A37	-	R11	-198.3	R25	-132.7	W3	-273.6	W17	-33.2
A10	-158.7	A24	-	A38	-	R12	-200.5	R26	-149.1	W4	-302.9	W18	-76.6
A11	-80.7	A25	-	A39	-	R13	-241.3	R27	-166.1	W5	-236.7	W19	-299
A12	-90.6	A26	-	A40	-	R14	-	R28	-235.2	W6	-125.7	W20	-284
A13	-43.8	A27	-	R1	-183	R15	-138.9	R29	-421	W7	-157.8	W21	-142.4
A14	-70.8	A28	-	R2	-191.8	R16	-161.6	R30	-268.3	W8	-209.5	W22	-140

Таблица Наибольшие по модулю положительные и отрицательные средние ветровые давления для компонент покрытия *Объекта* среди всех исследуемых углов атаки ветра

Компонента	$\max_{\alpha_j}(P)$	$\min_{\alpha_j}(P)$	Компонента	$\max_{\alpha_j}(P)$	$\min_{\alpha_j}(P)$
R1	-82.4	-372	R19	-92.4	-298.2
R2	-153.5	-974.5	R20	-112.9	-445.3
R3	-119.3	-661.1	R21	-79.1	-477.6
R4	-91.8	-825.9	R22	-134.5	-472.3
R5	-79.7	-584.5	R23	-130.3	-464.7
R6	-162.9	-520	R24	-48.9	-281.9
R7	-183.5	-455.1	R25	-73.7	-421.7
R8	-159.8	-438.7	R26	-119.8	-465.4
R9	16.1	-312.6	R27	-126.5	-450.8
R10	-147.9	-348.6	R28	-52.8	-539.4
R11	-121.5	-463.1	R29	-85.2	-423.4
R12	-105.5	-415.6	R30	-63	-469
R13	-63.3	-442.2	R31	-141.5	-386.1
R14	-	-	R32	-114.1	-605.3
R15	-115.6	-426.4	R33	-116.3	-740.7
R16	-107.3	-432.9	R34	-112.1	-652.7
R17	-91.6	-355.3	R35	-82.3	-717.8
R18	-114.4	-515	R36	-82.5	-635.4

3. Пиковые ветровые давления на ограждающие конструкции

В главе были представлены результаты моделирования ветровых нагрузок на ограждающие (фасадные) конструкции Объекта на основе физического (экспериментального) и математического (численного) моделирования.

Результаты моделирования представлены в следующем виде:

- определенные по результатам математического моделирования покомпонентные максимальные, минимальные и осредненные значения пиковых ветровых давлений;
- определенные по результатам математического моделирования картины распределения пиковых ветровых давлений по поверхности Объекта.
- определенные по результатам физического моделирования покомпонентные пиковые ветровые давления.

Положительные значения пиковых ветровых давлений соответствуют напору, а отрицательные – отсосу.

Все приведенные в главе значения ветровых нагрузок являются *расчетными* (с учетом коэффициента надежности по нагрузке $\gamma_f = 1.4$).

Результаты математического моделирования

На рисунках представлены картины распределения пиковых ветровых давлений по поверхностям Объекта.

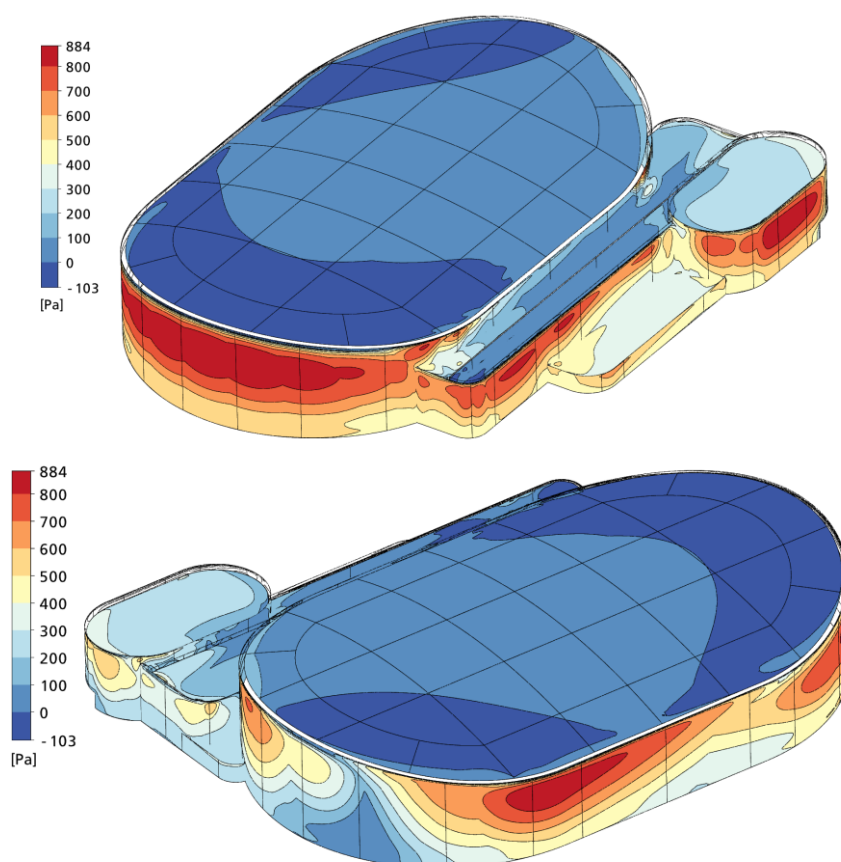


Рис. Положительные пиковые ветровые давления на поверхностях Объекта, Па

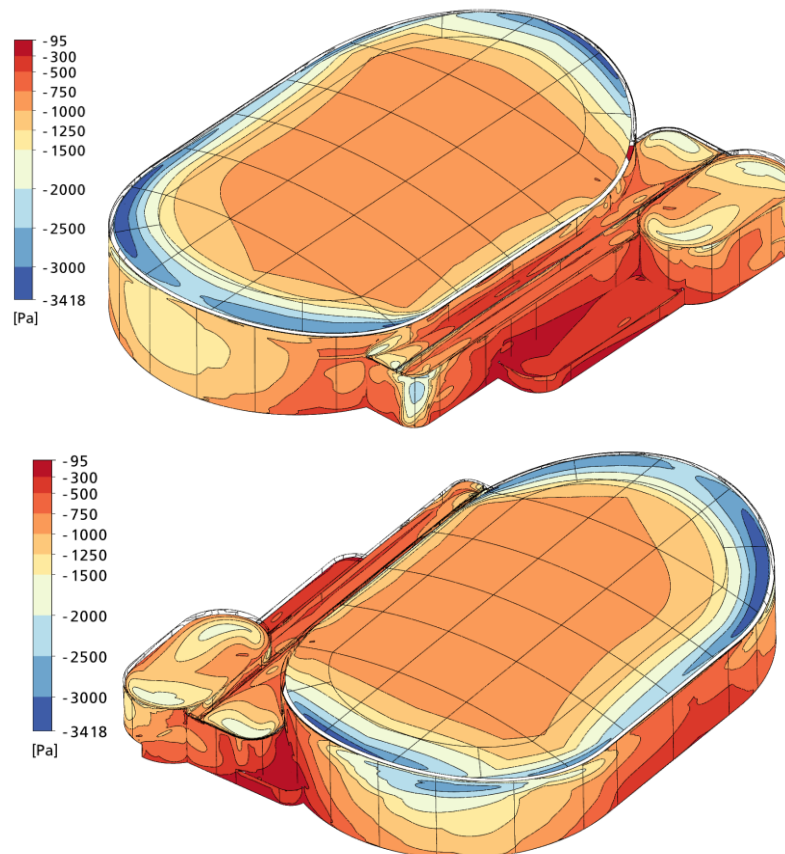


Рис. Отрицательные пиковые ветровые давления на поверхностях Объекта, Па

Результаты физического моделирования

Для удобства использования пиковые ветровые давления на ограждающие (фасадные) конструкции по результатам физического моделирования приведены по той же номенклатуре, что и результаты математического моделирования.

В пункте представлены пиковые ветровые давления для соответствующих компонент в табличном виде без учета коэффициента корреляции $v_{+(-)}$, который следует учитывать при обосновании механической безопасности ограждающих (фасадных) конструкций и назначать в соответствии с таблицей 11.8 СП 20.

Таблица Пиковые ветровые давления для компонент Объекта, Па

№ комп.	$P_{max,env}$	$P_{min,env}$	№ комп.	$P_{max,env}$	$P_{min,env}$	№ комп.	$P_{max,env}$	$P_{min,env}$	№ комп.	$P_{max,env}$	$P_{min,env}$
A1	608	-525	A26	-	-	R11	-6	-959	R36	47	-1778
A2	676	-792	A27	-	-	R12	-7	-856	W1	792	-881
A3	570	-626	A28	-	-	R13	58	-1551	W2	752	-1202
A4	553	-414	A29	-	-	R14	-	-	W3	733	-1066
A5	530	-420	A30	-	-	R15	-83	-882	W4	752	-1023
A6	513	-395	A31	-	-	R16	-84	-884	W5	677	-1202
A7	509	-402	A32	-	-	R17	-54	-707	W6	728	-552
A8	444	-426	A33	-	-	R18	-116	-1607	W7	789	-623
A9	494	-507	A34	-	-	R19	-90	-658	W8	744	-1053
A10	576	-490	A35	-	-	R20	-113	-958	W9	767	-1204
A11	576	-670	A36	-	-	R21	-52	-1032	W10	864	-911
A12	589	-809	A37	-	-	R22	-162	-1032	W11	920	-899
A13	703	-1502	A38	-	-	R23	-93	-1408	W12	905	-953
A14	624	-984	A39	-	-	R24	-17	-764	W13	950	-1083
A15	624	-433	A40	-	-	R25	-42	-867	W14	888	-634
A16	524	-585	R1	-46	-1040	R26	-63	-944	W15	657	-973
A17	718	-303	R2	-140	-2236	R27	-134	-946	W16	379	-688
A18	-	-	R3	-76	-1481	R28	40	-1659	W17	52	-556
A19	-	-	R4	43	-1937	R29	-102	-1299	W18	191	-707
A20	-	-	R5	46	-1613	R30	-59	-1016	W19	113	-1230
A21	-	-	R6	-229	-1482	R31	-82	-1283	W20	800	-733
A22	-	-	R7	-111	-1371	R32	-149	-1806	W21	525	-1863
A23	-	-	R8	-86	-1319	R33	-105	-1684	W22	903	-585
A24	-	-	R9	147	-721	R34	-74	-1502			
A25	-	-	R10	-55	-734	R35	67	-1524			

4. 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.

Для сопоставления средних ветровых давлений выбраны углы 150° и 210° в связи с наименьшим влиянием окружающей застройки на обтекание Объекта.

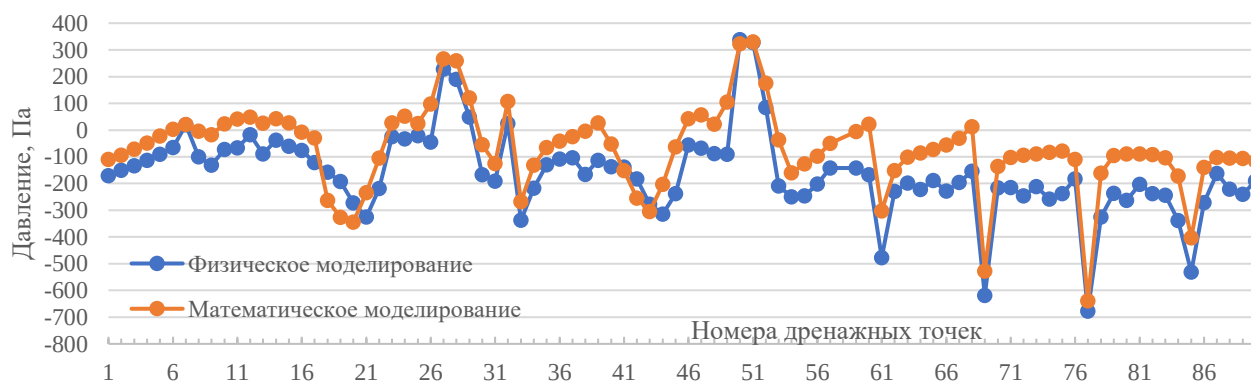


Рис. Сопоставление средних ветровых давлений, полученных по результатам математического и физического моделирования для направления ветра 150°

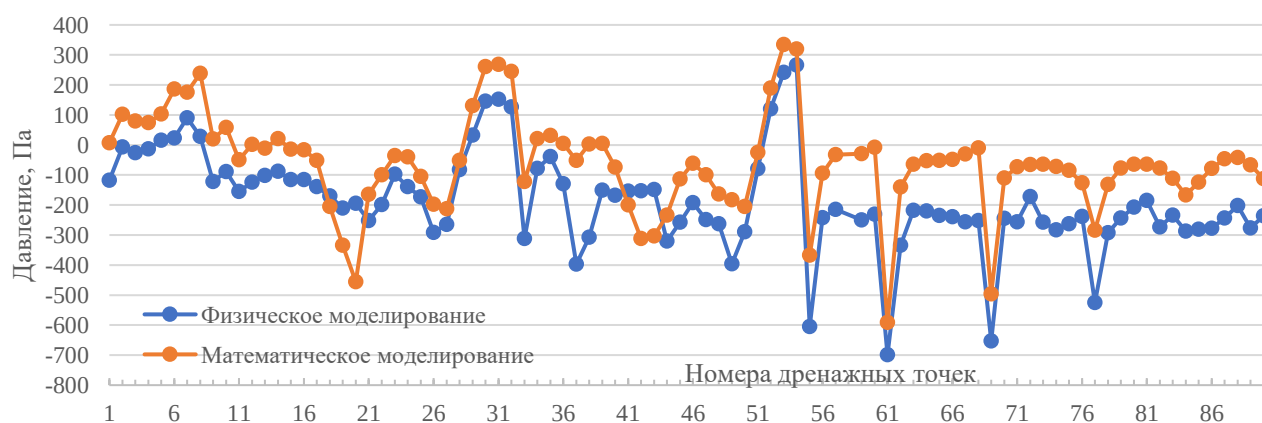


Рис. Сопоставление средних ветровых давлений, полученных по результатам математического и физического моделирования для направления ветра 210°

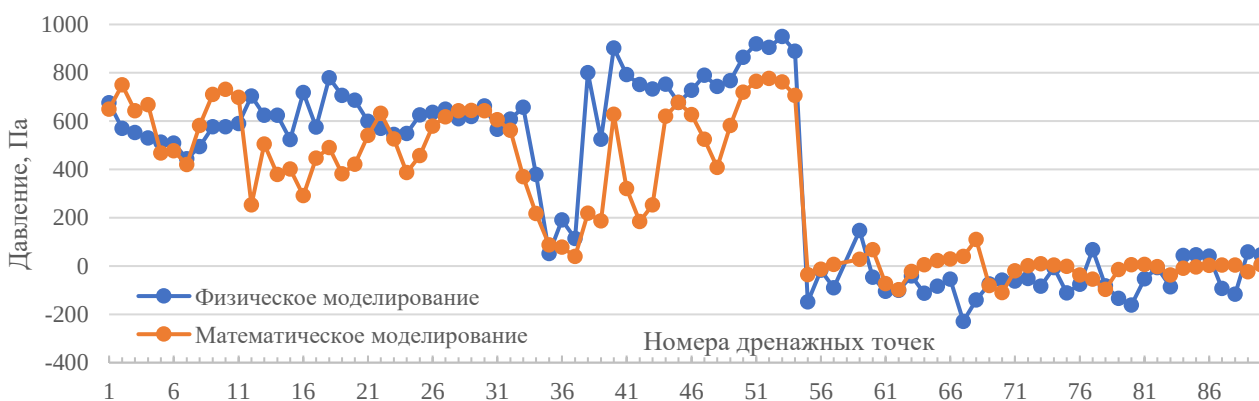


Рис. Сопоставление положительных пиковых ветровых давлений, полученных по результатам математического и физического моделирования

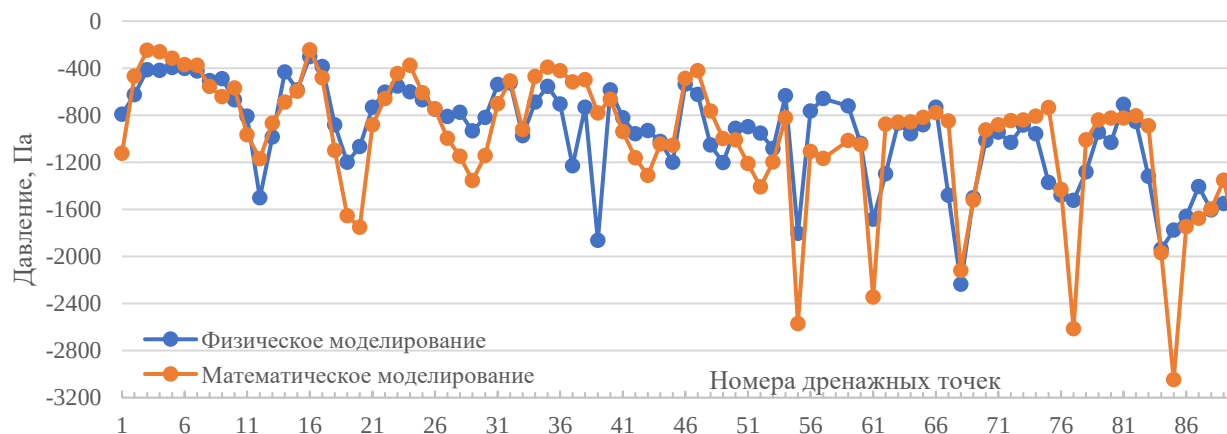


Рис. Сопоставление отрицательных пиковых ветровых давлений, полученных по результатам математического и физического моделирования

Анализ и обобщение результатов

Проведен сопоставительный анализ результатов математического и физического моделирования. Полученные средние и пиковые ветровые давления в целом согласуются по характеру и абсолютным значениям, что подтверждает высокое качество проведенных исследований. Оба подхода имеют и преимущества, и недостатки, что определяется допущениями и граничными условиями, применяемыми в рамках решения задач. Так, к основным отличиям указанных методов относятся:

- различные граничные условия;
- различные параметры турбулентности;
- различные пространственно-временные масштабы;
- различия в возможностях учета окружающей застройки и рельефа местности.

Использование двух научных методов для исследования параметров ветровых нагрузок позволяет найти консервативное решение, в рамках которого следует принять нагрузки как «взаимоисключающие» в расчетных сочетаниях.

5. 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) моделирования и физического (экспериментального) снеговых нагрузок.

Расчетные значения снеговых нагрузок

Для комбинирования нагружений покрытия *Объекта* были условно разделены на *верхнее* и *нижние*. Для *верхнего* покрытия *Объекта* необходимо рассмотреть одно равномерное и десять вариантов неравномерного нагружения, для нижних покрытий объекта – одно равномерное и четыре варианта неравномерного нагружения. Неравномерные нагружения необходимо рассмотреть в комбинациях в соответствии с табл. Для жёлоба на верхнем покрытии *Объекта* следует принять значение коэффициента формы μ : **1.0** для равномерного распределения и **3.0** для неравномерных распределений.

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.

Таблица Комбинации неравномерных нагружений для покрытий *Объекта*

Верхнее покрытие											
Нижние	варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	✓		✓							
	2		✓		✓						
	3					✓		✓	✓		
	4						✓			✓	✓

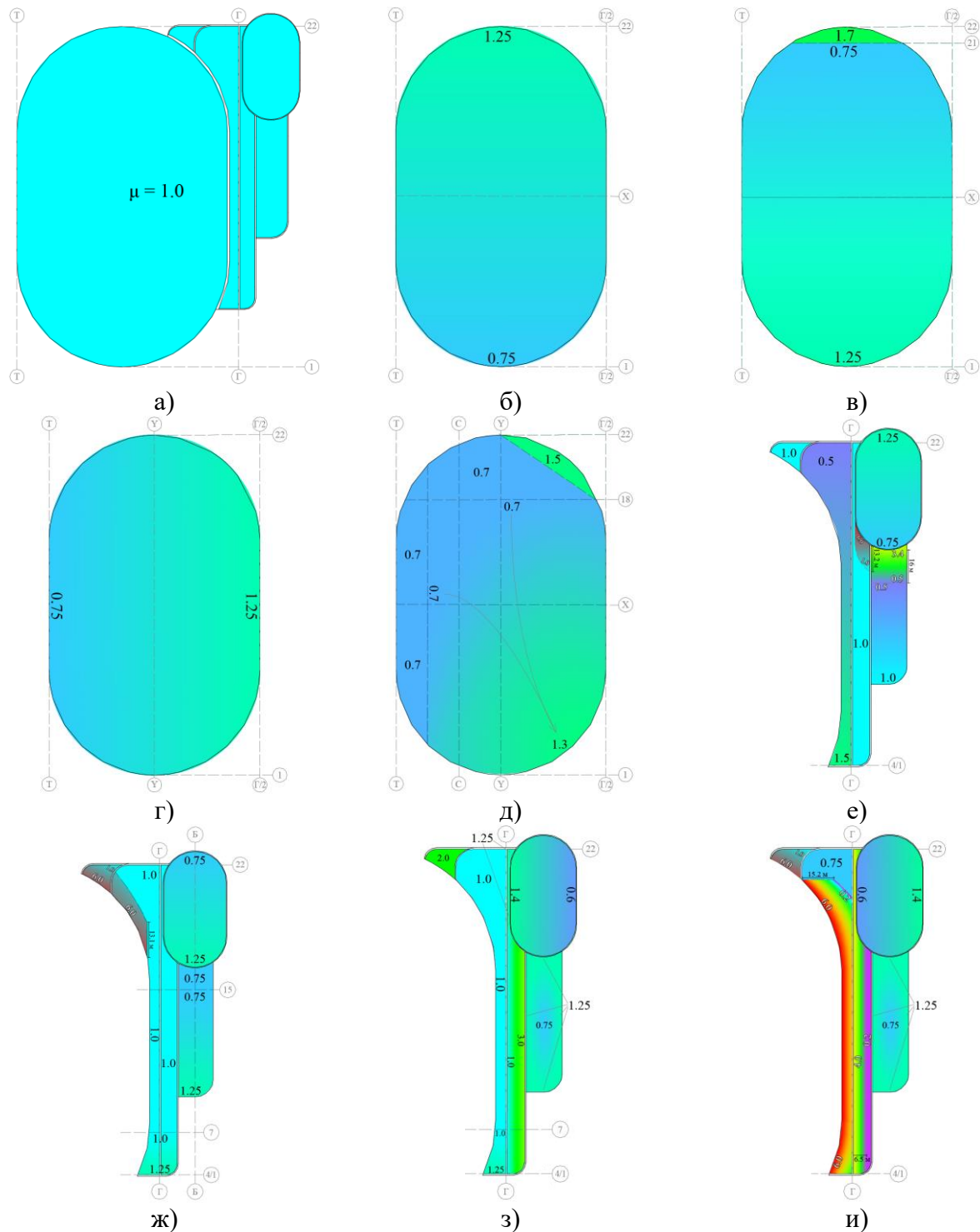


Рис. Схемы распределения расчетного коэффициента формы: а) равномерное для всех покрытий б) неравномерное, для верхнего покрытия, вариант 1, в) неравномерное, для верхнего покрытия, вариант 2, г) неравномерное, для верхнего покрытия, вариант 3 д) неравномерное, для верхнего покрытия, вариант 4 е) неравномерное, для нижнего покрытия, вариант 1 ж) неравномерное, для нижнего покрытия, вариант 2 з) неравномерное, для нижнего покрытия, вариант 2 и) неравномерное, для нижнего покрытия, вариант 3

Математическое моделирование коэффициента формы

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 и без учёта 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. Челябинск составляет 2.3 м/с (V_{10}). Расчёты проводились для следующих скоростей:

Табл.

Номер расчётного случая	Скорость на высоте 10 м, м/с	μ_0
1	1.0	1.0
2	3.0	1.0
3	8.0	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 8 ч, а время уноса осадков T_- – 240 ч.

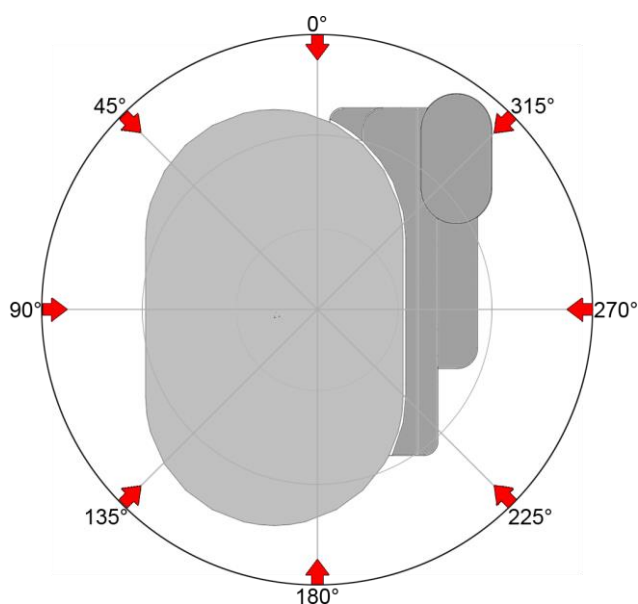


Рис. 8.11 Расчетные направления ветрового потока для покрытий *Объекта*.

Светлым выделено *верхнее покрытие*, тёмным – *нижние покрытия*

8.3 Физическое моделирование коэффициента формы

Испытания модели в масштабе 1:200. При обдуве модели с разных направлений моделируется ветровое влияние на снегоперенос в соответствии с розой ветров для данного региона. В эксперименте выполнена полная круговая экспозиция по направлению ветра с шагом 45° . Данного количества направлений ветрового потока достаточно для проектирования исследуемой конструкции с заданной надежностью. Предложены фотоснимки снегопереноса при разных направлениях ветра, с помощью которых можно

получить данные о виде явления снегопереноса, направлениях и объемах переносимого снега для каждого вида снегопереноса в отдельности.

Для всех рассматриваемых направлений по результатам серии аэродинамических испытаний составлены схематические картины результатов снегопереноса на поверхности кровли исследуемого объекта. Полученные результаты экспериментального моделирования учитывались при разработке рекомендуемых в расчетном обосновании механической безопасности схем снеговых нагрузок

Анализ и обобщение результатов

В силу сложной нестандартной формы покрытия Объекта при определении расчетных значений снеговых нагрузок применялся синтез нормативных рекомендаций (схемы Б.1, Б.8, Б.13 Приложения Б к СП 20.13330.2016), математического (численного) и физического (экспериментального) моделирования снеговых нагрузок. Полученные с помощью этого подхода значения «нормативного» 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.

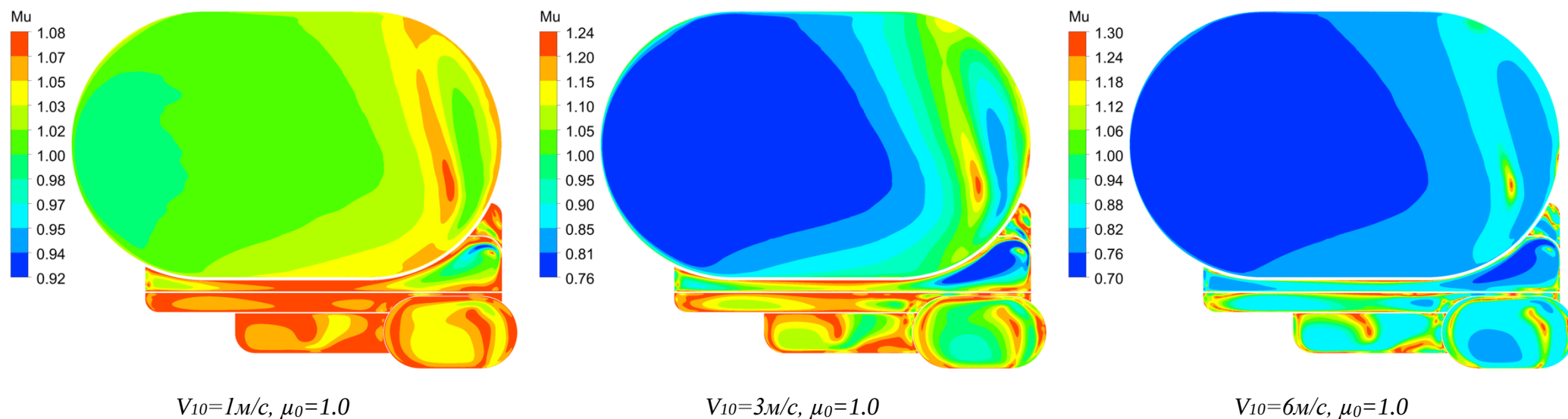


Рис. 8.12 Математически моделируемый коэффициент формы μ_{mm} для направления ветра 0°



Рис. 8.13 Физически моделируемый коэффициент формы $\mu_{\text{фр}}$ для направления ветра 0°

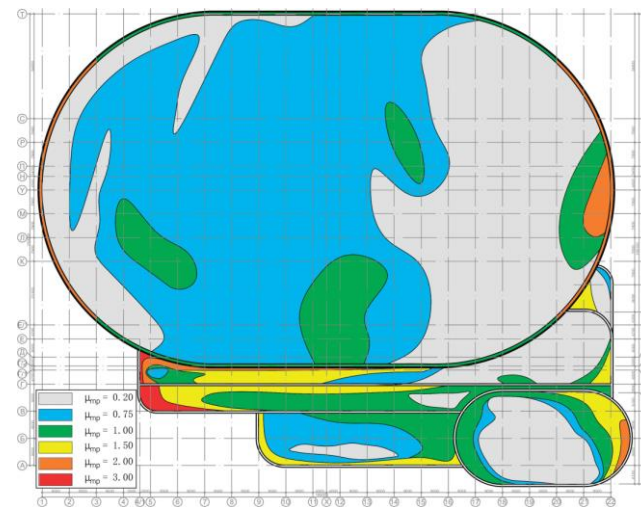


Рис. 8.14 Схема снегопереноса по результатам физического моделирования для направления ветра 0°

Выводы и рекомендации

По результатам выполненных комплексных аэродинамических исследований по Объекту «Крытый футбольный манеж по ул. Университетской Набережной Калининском районе г. Челябинска» на основе математического (численного) и физического (экспериментального) моделирования, можно сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. На основе анализа и обобщения исходных данных разработаны:
 - трехмерные математические (численные) модели аэродинамики Объекта с учетом окружающей застройки в радиусе 750м.
 - физические модели аэродинамики Объекта без учета окружающей застройки (за исключение малых зданий в непосредственной близости).

2. С использованием современных численных методов гидрогазодинамики, реализованных в программном комплексе ANSYS CFD (Fluent) в комбинации с авторскими методиками решения узкоспециализированных задач строительной аэродинамики, проведены многовариантные расчетные аэродинамические исследования Объекта для 24 направлений ветра с учётом окружающей застройки и моделирование снеговых нагрузок для 48 расчетных случаев: 8 направлений ветра при 3 различных скоростях ветра с учётом окружающей застройки.

3. С использованием большой исследовательской градиентной аэродинамической трубы архитектурно-строительной специализации (БИГАТ НИУ МГСУ) проведены многовариантные экспериментальные исследования аэродинамики Объекта для 24 направлений ветра и моделирование снегопереноса и снегонакопления для 8 направлений ветра.

4. Определены расчетные средние ветровые давления на несущие конструкции Объекта.

При обосновании механической безопасности несущих конструкций Объекта **рекомендуется** рассмотреть наиболее опасные и характерные направления ветра, указанные в соответствующем разделе. Результаты математического и физического моделирования следует использовать как «взаимоисключающие» в расчетных сочетаниях нагрузок.

5. Определены пиковые ветровые давления на ограждающие конструкции Объекта.

При обосновании механической безопасности ограждающих (фасадных) конструкций Объекта **рекомендуется** использовать результаты математического и физического моделирования, представленные в отчете. Результаты математического и физического моделирования следует использовать как «взаимоисключающие» в расчетных сочетаниях нагрузок.

6. Проведен сопоставительный анализ результатов математического и физического моделирования. Полученные средние и пиковые ветровые давления в целом согласуются по характеру и абсолютным значениям, что подтверждает высокое качество

проведенных исследований. Оба подхода имеют и преимущества, и недостатки, что определяется допущениями и граничными условиями, применяемыми в рамках решения задач. Так, к основным отличиям указанных методов относятся:

- различные граничные условия;
- различные параметры турбулентности;
- различные пространственно-временные масштабы;
- различия в возможностях учета окружающей застройки и рельефа местности.

Использование двух научных методов для исследования параметров ветровых нагрузок позволяет найти консервативное решение, в рамках которого следует принять нагрузки как «взаимоисключающие» в расчетных сочетаниях.

7. Разработаны рекомендации по назначению снеговой нагрузки на покрытие Объект. В прочностных расчетах Объекта рекомендуется использовать распределения «нормативного» коэффициента формы μ в соответствии с рисунком схем настоящего отчёта в комбинациях, указанных в отчете.