



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Национальный исследовательский

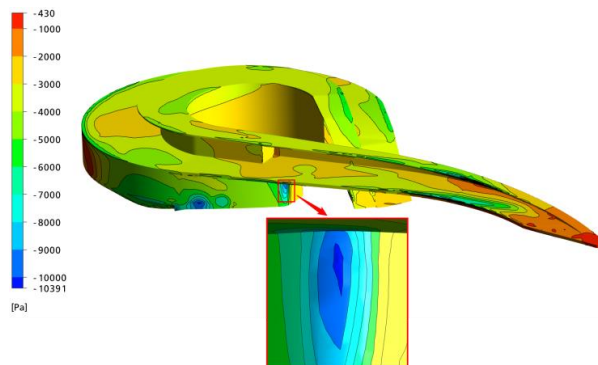
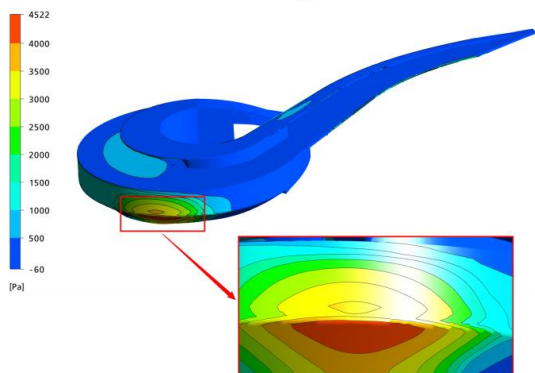
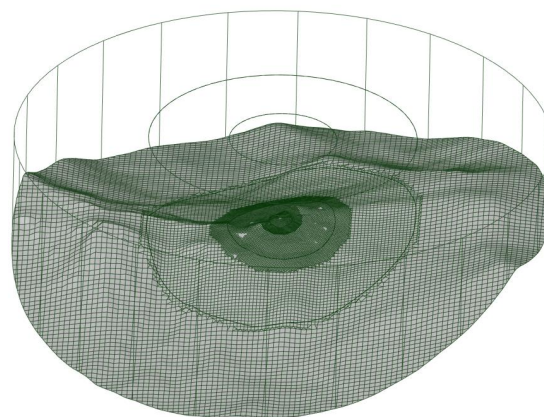
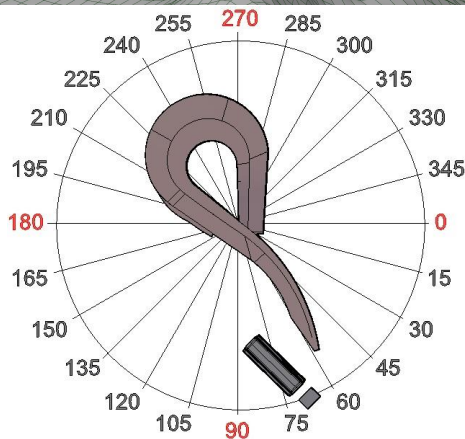
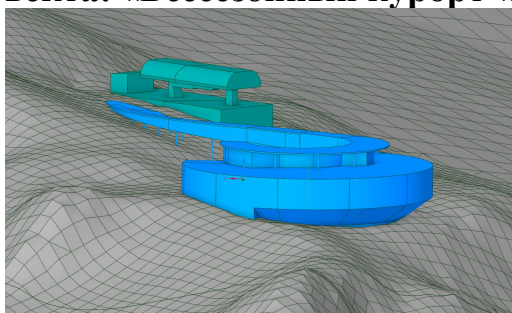
Московский государственный строительный университет

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

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

по теме:

**«Расчетно-экспериментальные исследования ветровых воздействий для  
Объекта: «Всесезонный курорт «Манжерок», панорамный ресторан»**



МОСКВА, 2022

## **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. Проектирование и создание масштабной модели Объекта с учетом сложного рельефа местности в радиусе 0.15 км для последующего проведения физического (экспериментального) моделирования ветровых воздействий.
3. Разработка математической (численной) аэродинамической модели рельефа местности с учетом лесных массивов в достаточном радиусе вокруг объекта, но без учета самого Объекта.
4. Определение средних и пиковых значений аэродинамических коэффициентов давления в контрольных точках на основе физического (экспериментального) моделирования.
5. Определение коэффициентов орографии местности рядом с Объектом и последующее вычисление пиковых ветровых давлений, используя аэродинамические коэффициенты, определенные по результатам физического (экспериментального) моделирования.
6. Разработка аэродинамических моделей Объекта с учетом локального рельефа местности и лесных массивов для последующего проведения математического (численного) моделирования ветровых воздействий;
7. Определение распределения пиковых (минимального и максимального) ветровых давлений на ограждающие (фасадные) конструкции Объекта на основе результатов математического (численного) моделирования.
8. Сопоставление пиковых ветровых давлений по результатам математического и физического моделирования.

## Площадка строительства, рельеф и застройка объекта

Земельный участок под строительство Объекта (всесезонный курорт «Манжерок») расположен по адресу: Республика Алтай, Майминский район, на горе Малая Синюха с Верхней станцией 1020м.

Рельеф местности вокруг Объекта сложный с перепадами высот в сотни метров, что оказывает существенное влияние на ветровые потоки. Местность вокруг Объекта на многие километры лесистая. Однако от хребта горы в восточную и южную стороны расходятся просеки для горнолыжных трасс и подъемников. Таким образом, согласно СП 20 принят тип местности *B*, ветровой район *III*.

Согласно данным ближайшей метеостанции, расположенной в 60-70 км к юго-востоку от исследуемого Объекта, преобладающий ветер – Юго-Восточный.

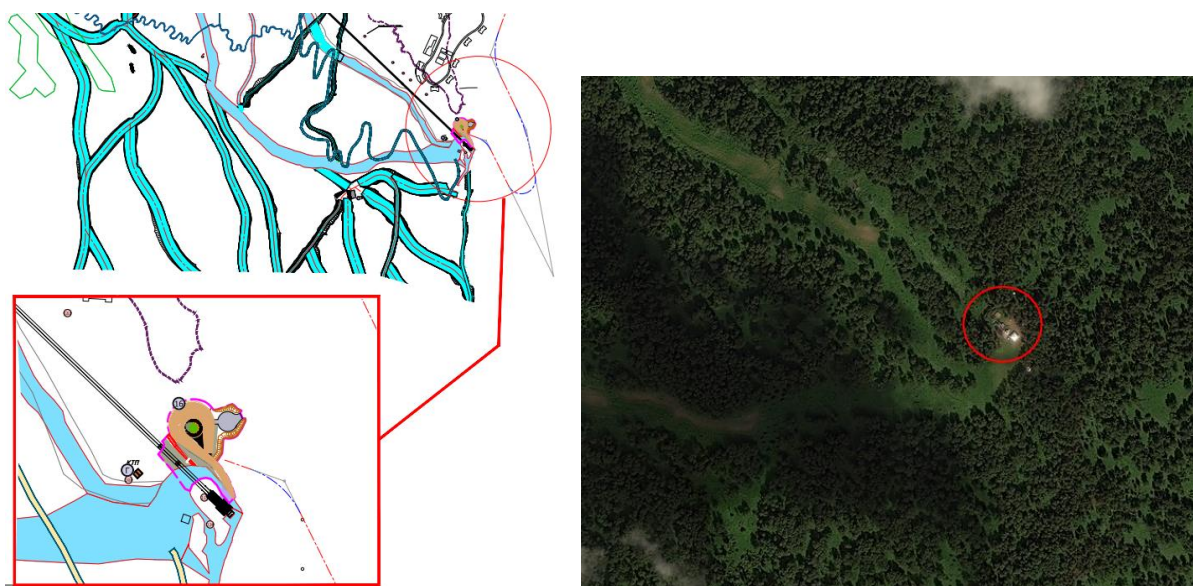


Рис. Ситуационный план Объекта и карта местности возле площадки строительства

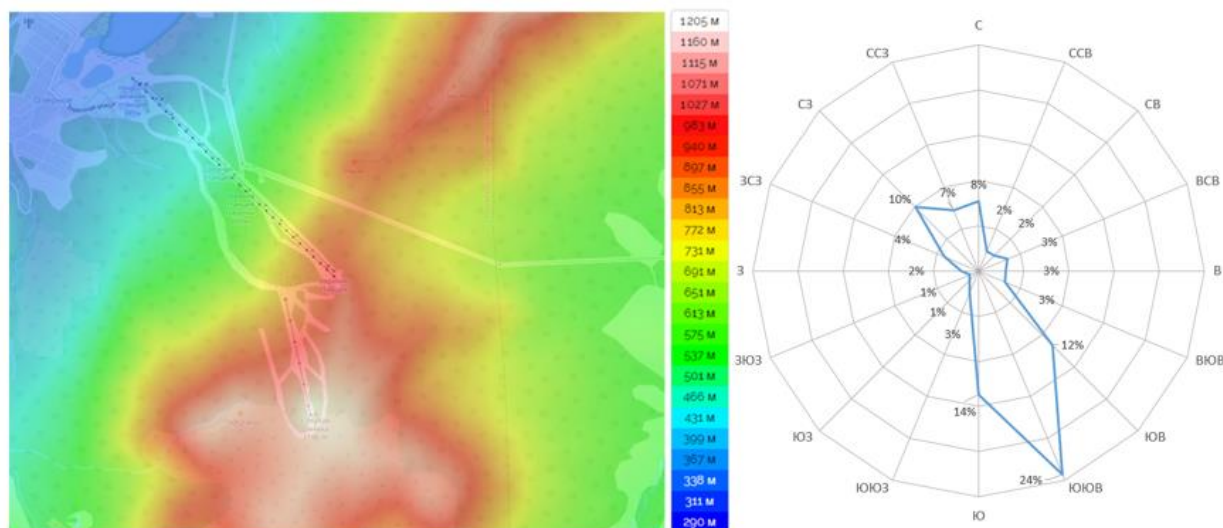


Рис. Карта высот возле площадки строительства (ru-ru.topographic-map.com) и повторяемость ветров по данным ближайшей метеостанции

## Краткая характеристика исследуемого Объекта

Ресторан представляет собой 3-х этажное сооружение улиткообразной формы с фасадами, потенциально уязвимыми к ветровым нагрузкам. Рядом со зданием гостиницы расположено сооружение станции горнолыжных подъемников.



Рис. Рендер ресторана (версия несколько отличается от рабочей)

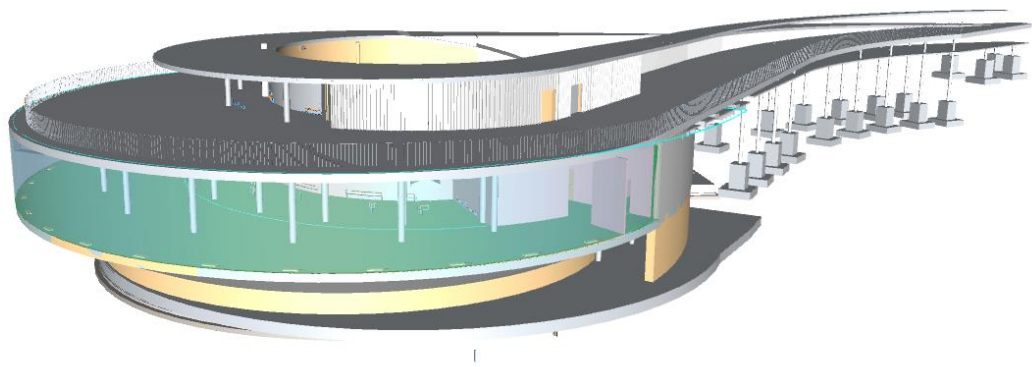


Рис. Модель ресторана в Navisworks, предоставленная заказчиком [1]

## 2. Разработка и верификация расчетных моделей

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

- *модель 1* для определения коэффициента орографии  $c_0$  – без учета самого Объекта, только рельеф и лесные массивы;
- *модель 2* для определения пиковых ветровых давлений на ограждающие (фасадные) конструкции ресторана.

### Геометрические модели Объекта

Практическая подготовка расчетных моделей начинается с создания геометрической объемной модели Объекта и рельефа окружающей местности в радиусе  $1500\text{м}$ . Геометрия зданий и сооружений Объекта выполнена согласно предоставленной заказчиком модели [1]. Рельеф моделировался на основе предоставленных данных топосъемок, спутниковых данных (earth.google.com) и предоставленной исходной модели с ближайшим к Объекту рельефом в формате \*.dwg. Объемные и плоские геометрические модели создавались в модуле ANSYS SpaceClaim (рис. 4.1-4.2). Влияние лесных массивов моделях учитывалось с помощью эквивалентно-проницаемых тел, поэтому в геометрической модели были заданы специальные объемы с разными параметрами проницаемости, консервативно описывающие три характерных типа лесных массивов (рис. 4.1-4.3). При моделировании консервативно принималась высота лесных массивов в  $20\text{м}$  над землей.

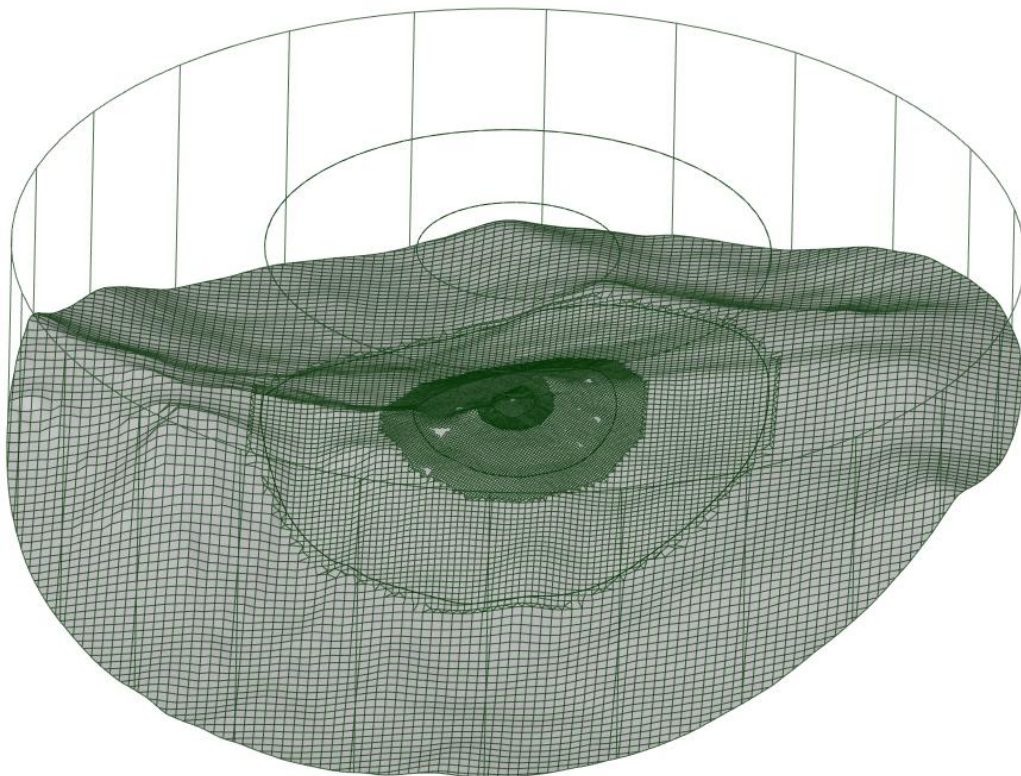


Рис. Модель 1. Геометрическая модель. Общий вид (скрыты все поверхности, кроме составляющих рельеф)

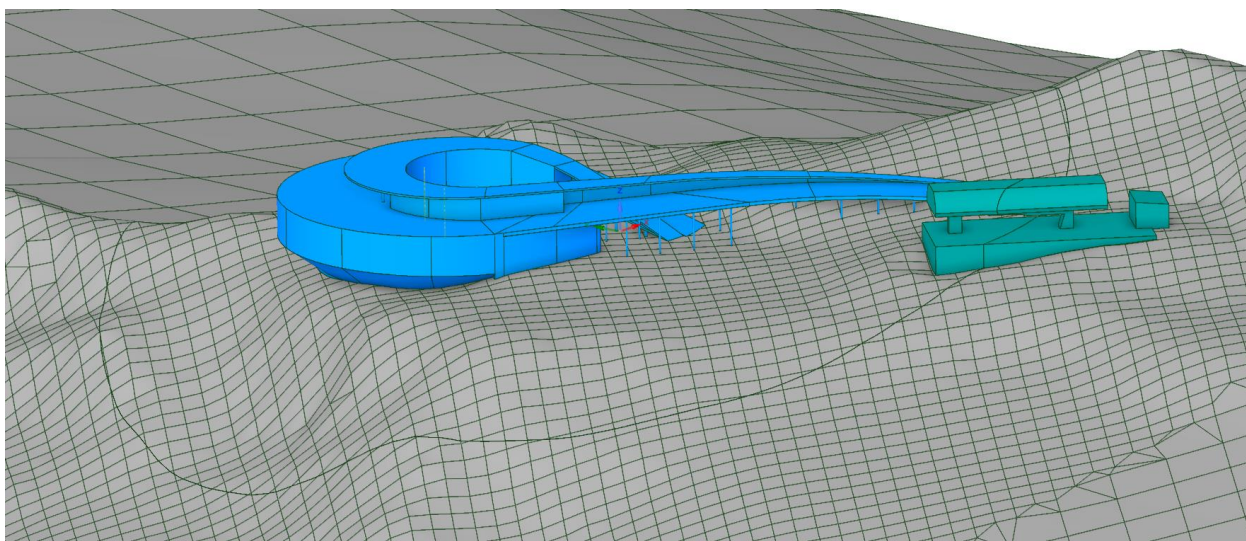
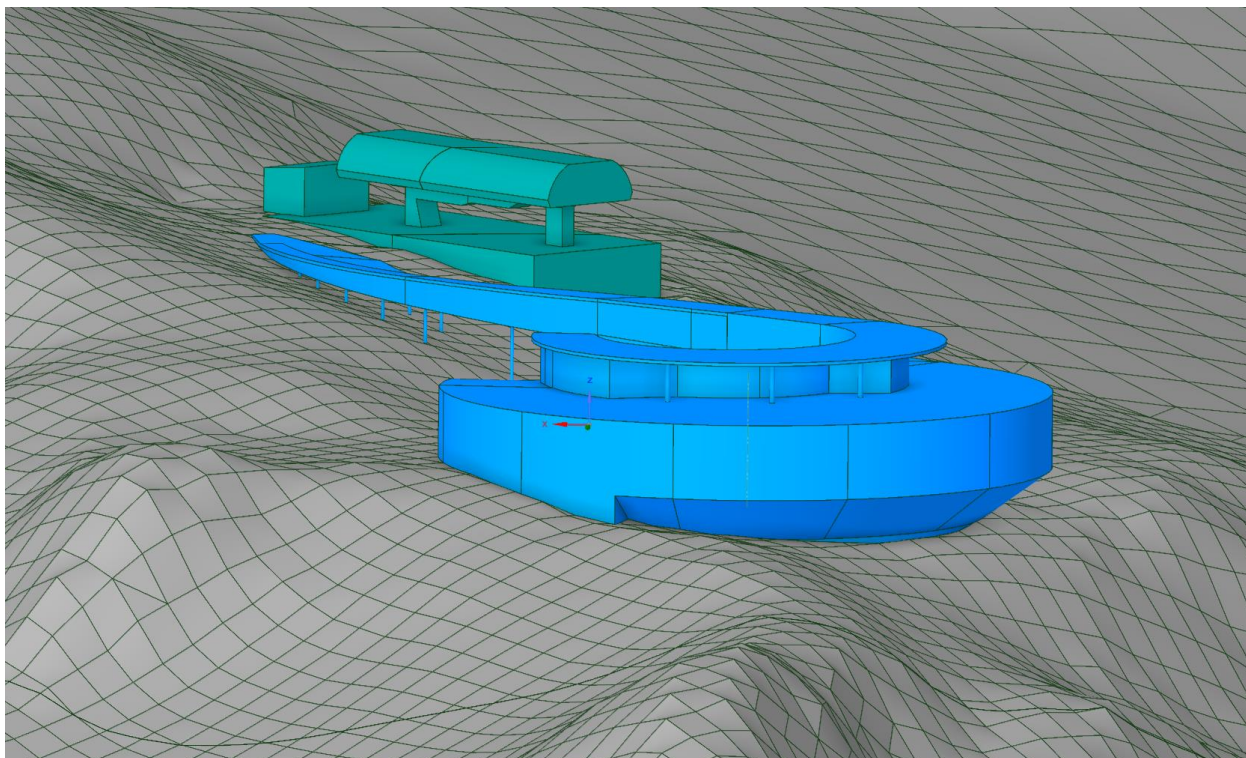


Рис. Модель 2. Геометрическая модель Объекта с учетом станции подъемников и рельефа местности

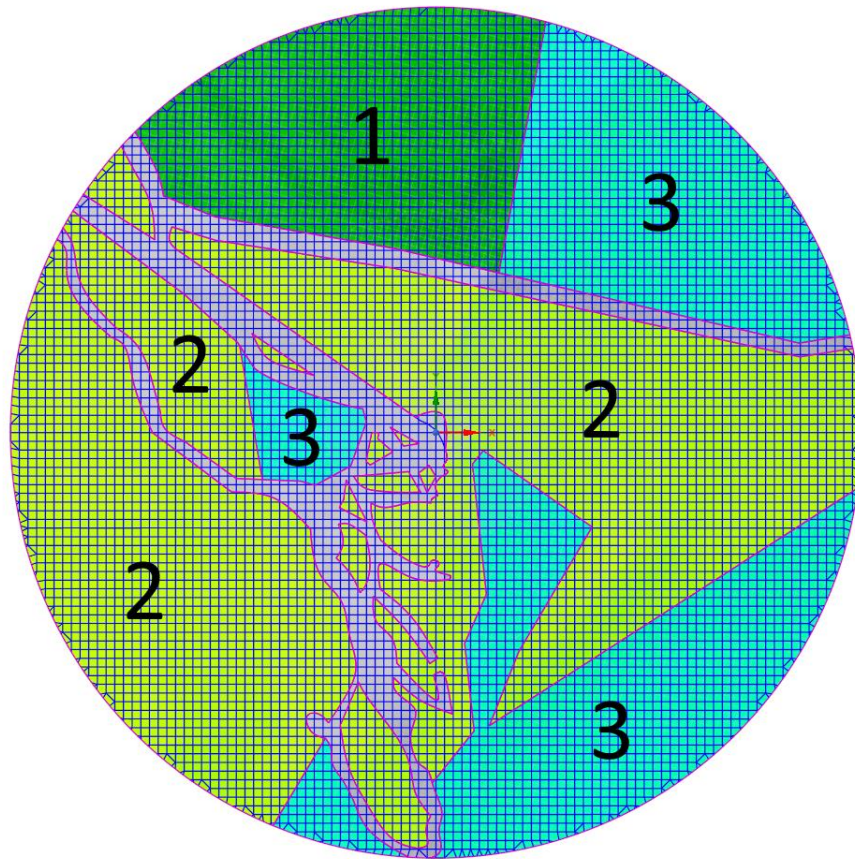


Рис. Схема типов лесных массивов:  
1 – густой лес (проницаемость 85%), 2 – лес средней густоты (проницаемость 90%),  
3 – редкий лес (проницаемость 95%)

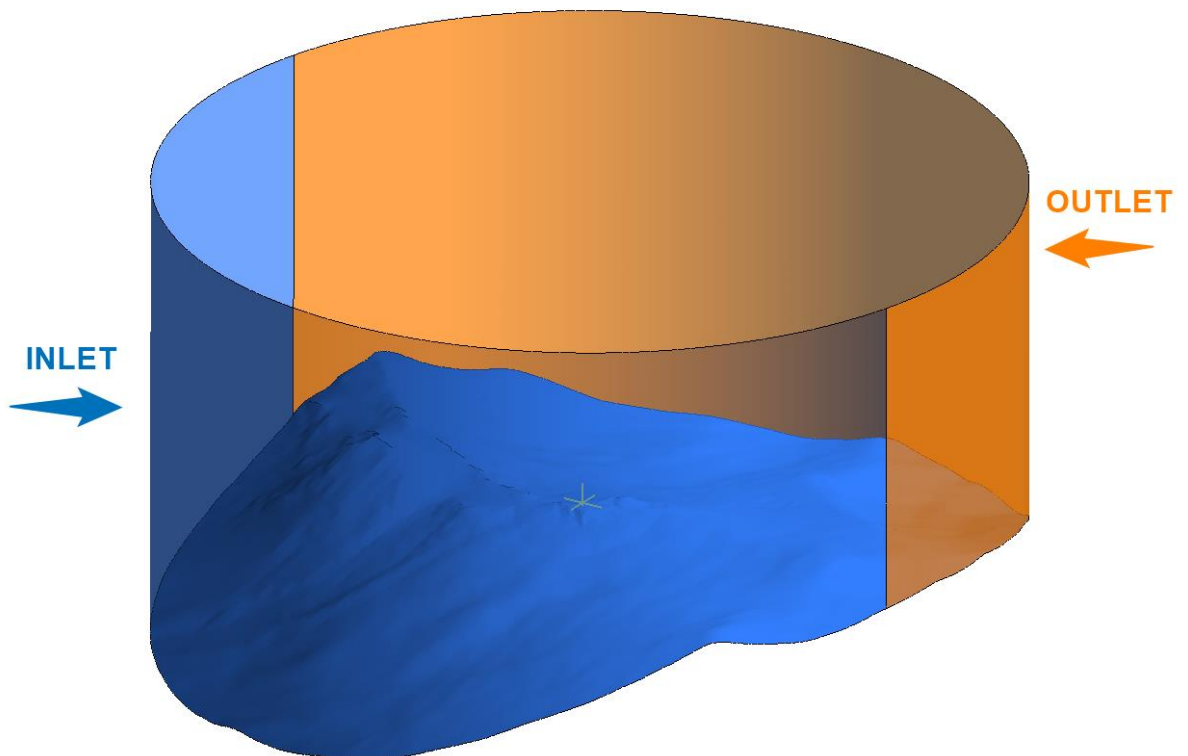


Рис. Расчетная область *Модели 1* (ANSYS CFX) с обозначенными граничными условиями.  
Угол атаки 285°

### 3. Определение ветровых нагрузок на основе математического моделирования

#### Определение коэффициента орографии

Исследуемый Объект фактически находится на хребте горы на высоте около 1000 метров над уровнем моря. При этом в нескольких километрах уровень местности падает до 300 метров над уровнем моря. Также существенное влияние на аэродинамику объекта оказывают лесные массивы, расположенные по склонам горы и «тормозящие» ветровые потоки. Формулы 11.2 и 11.10 СП 20 не учитывают такие крутые изменения рельефа местности и непосредственно лесные массивы. Поэтому для корректного определения ветровых нагрузок необходимо, как это сделано в Eurocode, ввести дополнительный коэффициент орографии местности  $c_o$ . Он определяется отношением скорости ветра над возвышенностью  $V_m$  к скорости ветра для равнины на соответствующей высоте  $V_m$ .

В общем случае коэффициент орографии  $c_o$  зависит от высоты над поверхностью земли  $z$  у Объекта. Но так как высота исследуемого Объекта мала, то коэффициент орографии целесообразно принять постоянным по высоте ( $c_o(z)=c_o$ ), но разным для различных направлений ветра.

Коэффициент орографии местности для учета влияния рельефа на профиль ветра вычисляется на основе математического (численного) моделирования ветровых потоков в радиусе 1500 м от Объекта.

Для определения коэффициента орографии для исследуемого Объекта была выбрана контрольная точка, находящаяся приблизительно в геометрическом центре Объекта на высоте 10 м от поверхности земли. В данной точке измерялась скорость ветра для нормативного профиля скорости ветра ( $\gamma_f = 1.0$ ) при 25-и направлениях ветра (с шагом  $15^\circ$  и дополнительным направлением  $215^\circ$  вдоль самой крупной лесной просек). Полученные скорости ветра и коэффициента орографии представлены в таб.

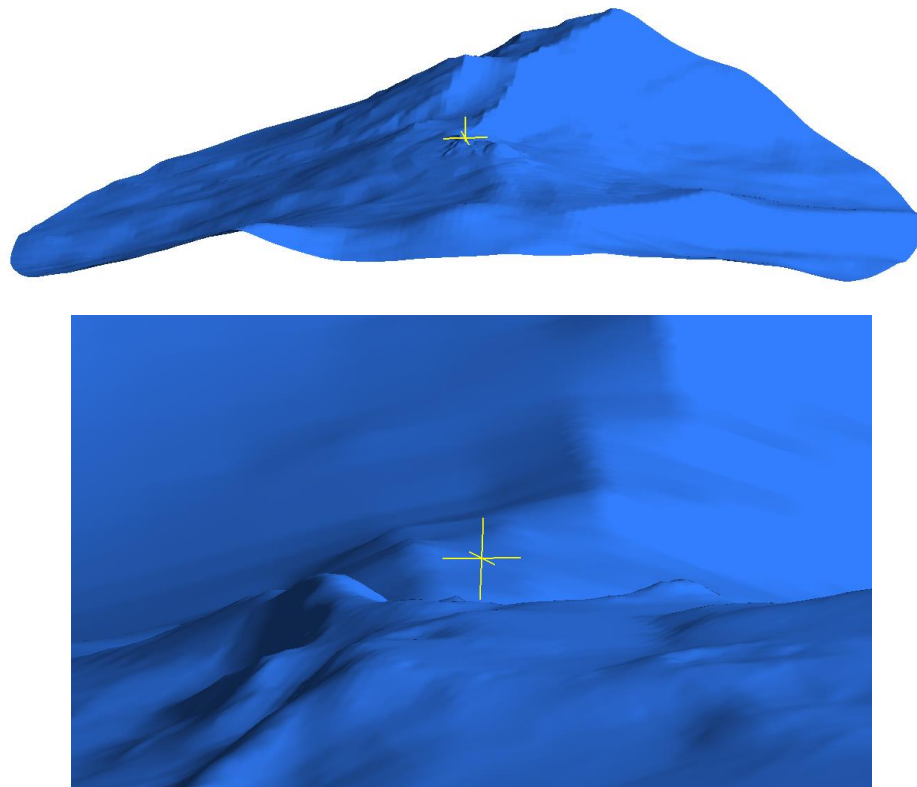


Рис. Расположение контрольной точки



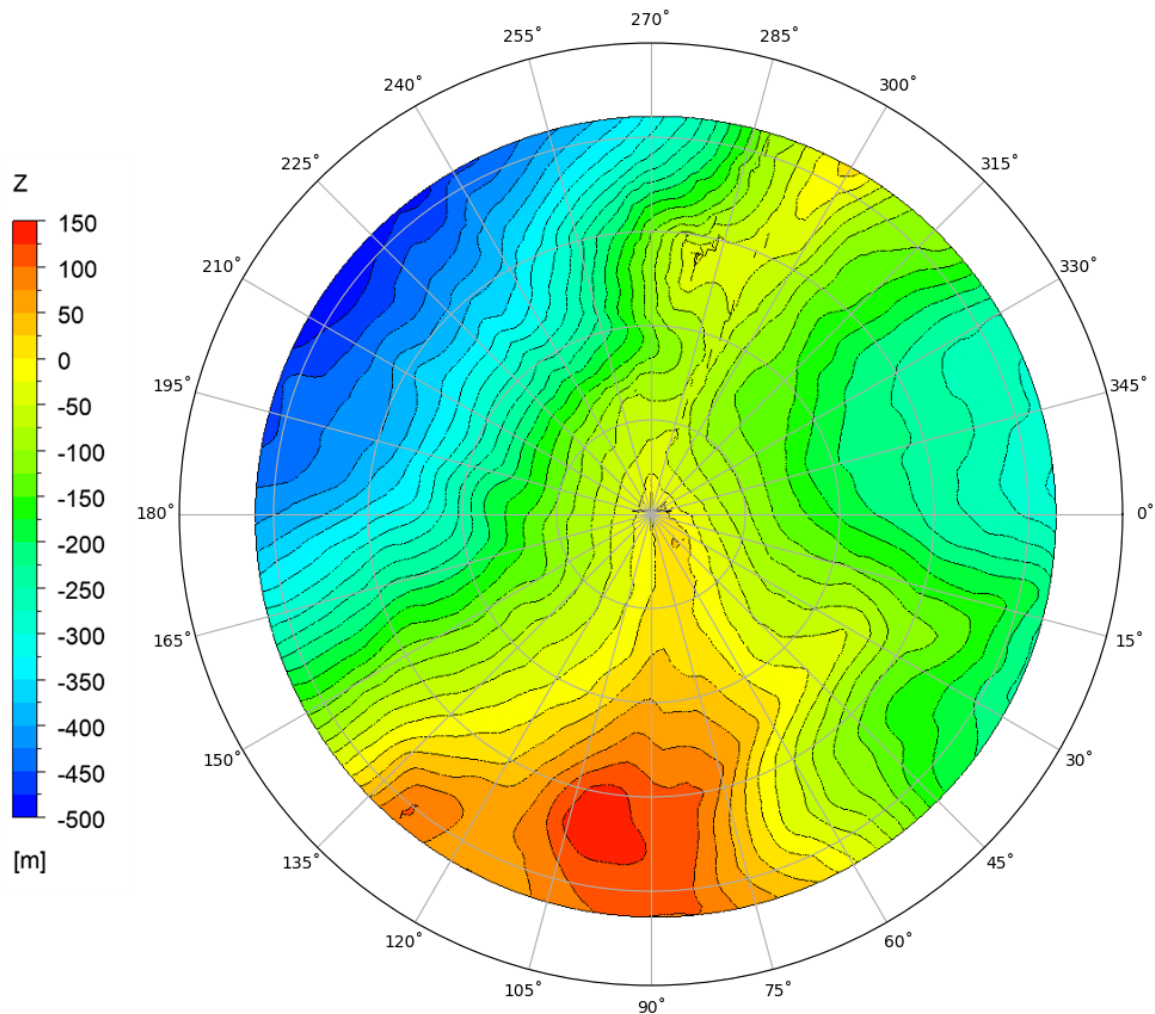


Рис. Расчетные направления ветра с отображением высот местности относительно отметки земли Объекта, м

Таблица 3.1 Скорость ветра в контрольной точке  $V_m$  и коэффициенты орографии  $c_0$  для 25-и направлений ветра.

Угол, °	$V_m$ , м/с	$c_0$	Угол, °	$V_m$ , м/с	$c_0$
0°	11.43	0.58	195°	54.94	2.76
15°	9.88	0.50	210°	67.19	3.38
30°	10.95	0.55	215°	63.67	3.20
45°	12.32	0.62	225°	54.03	2.72
60°	9.31	0.47	240°	35.50	1.79
75°	10.24	0.52	255°	22.78	1.15
90°	12.64	0.64	270°	23.76	1.20
105°	11.83	0.60	285°	16.19	0.81
120°	17.03	0.86	300°	21.02	1.06
135°	22.33	1.12	315°	20.49	1.03
150°	30.45	1.53	330°	16.87	0.85
165°	37.35	1.88	345°	13.92	0.70
180°	42.29	2.13			

## Расчетные ветровые нагрузки на Ресторан

В результате расчетов были получены:

- изополя верхней огибающей максимальных значений ветрового давления и нижней огибающей минимальных ветрового давления.
- максимальные и минимальные пиковые значения давления по характерным зонам стен и ограждений.

Верхнюю огибающую ветрового давления следует использовать в расчетах ограждающих (фасадных) конструкций в качестве пиковых положительных  $w_+$  ветровых воздействий.

Нижнюю огибающую ветрового давления следует использовать в расчетах ограждающих (фасадных) конструкций в качестве пиковых отрицательных  $w_-$  ветровых воздействий.

Все ветровые нагрузки, представленные в разделе – *расчетные* (с уч. коэффициента надежности по нагрузке  $\gamma_f=1.4$ ).

Схема нумерации характерных зон (компонент) представлена на рис.

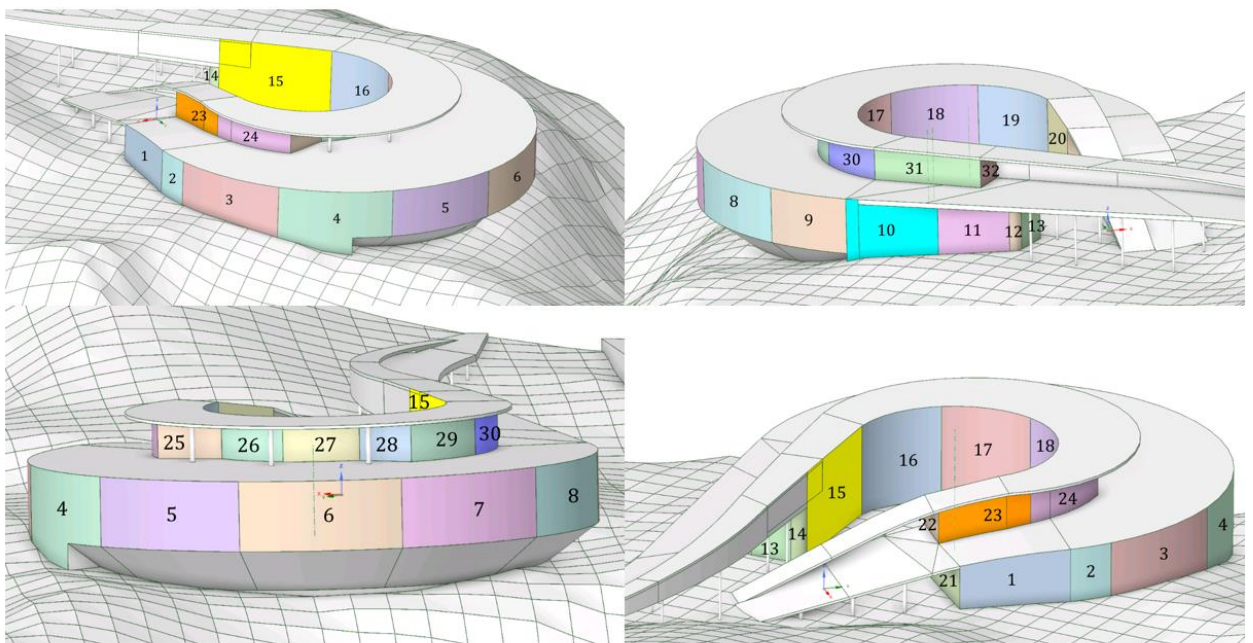


Рис. Схема нумерации характерных зон

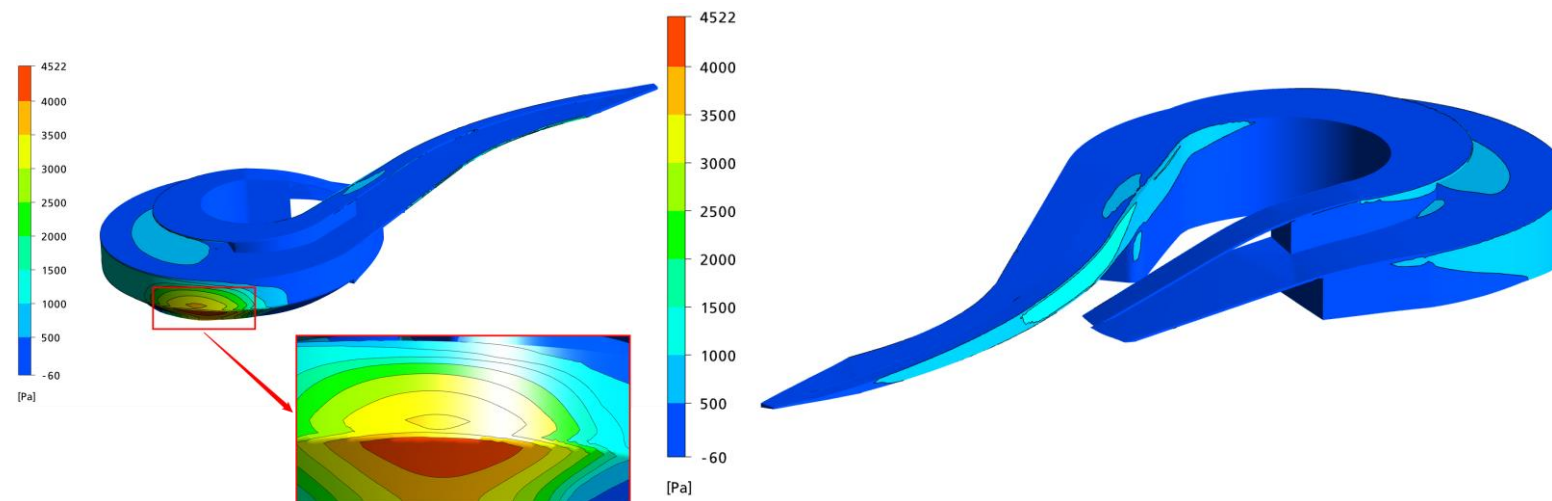


Рис. Верхняя огибающая максимальных значений ветрового давления (Па) на ограждающие конструкции *Ресторана*.

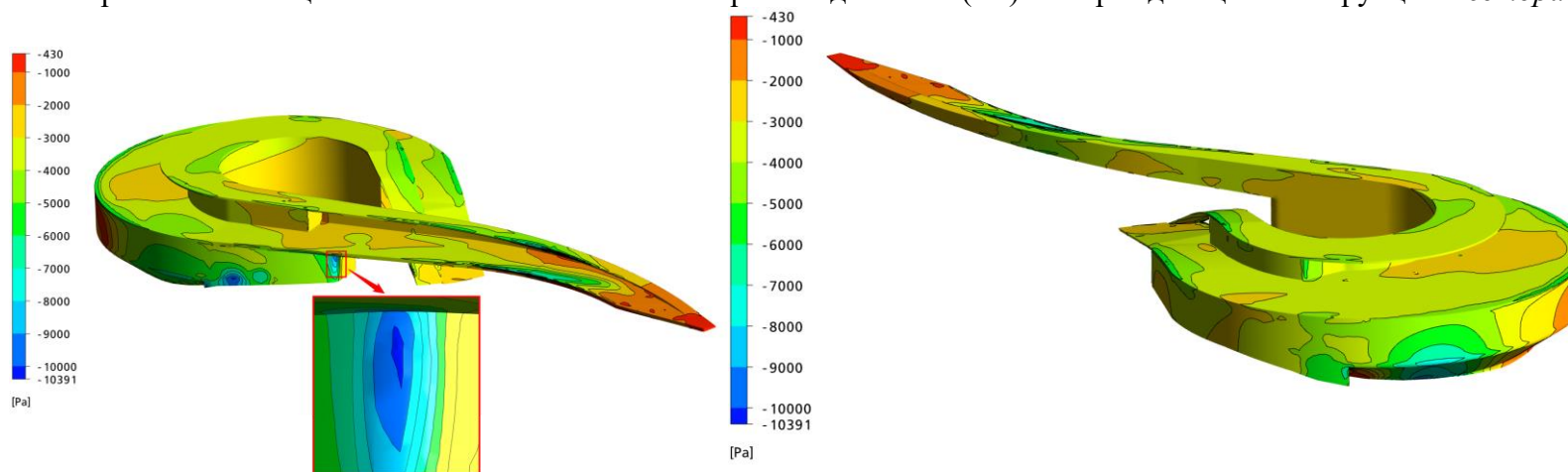


Рис. Нижняя огибающая минимальных значений ветрового давления (Па) на ограждающие конструкции *Ресторана*.

Таблица. Пиковые (максимальные и минимальные) ветровые давления для стен Объекта.

Зона	$P_{max}$ , Па	$P_{min}$ , Па
1	540	-5 983
2	624	-5 543
3	975	-4 687
4	1 194	-6 739
5	1 400	-7 486
6	3 578	-5 843
7	4 128	-5 839
8	2 552	-5 981
9	365	-7 467
10	376	-10 157
11	270	-6 975
12	281	-10 391
13	455	-7 264
14	536	-2 946
15	1 044	-3 429
16	979	-4 344
17	507	-4 532
18	326	-4 192
19	393	-3 298
20	365	-3 279
21	470	-4 771
22	398	-4 207
23	509	-4 049
24	635	-5 361
25	542	-5 474
26	593	-3 578
27	579	-3 062
28	524	-2 962
29	75	-3 642
30	163	-3 823
31	399	-3 465
32	212	-3 170

#### 4. Определение ветровых нагрузок на основе физического моделирования

В главе приводятся основная информация о созданной физической модели, настройке датчиков и результаты испытаний в виде аэродинамических коэффициентов давления  $C_p$ .

##### Проектирование и создание модели

Для физического (экспериментального) моделирования Заказчиком была предоставлена и согласована с Исполнителем модель исследуемого объекта. Учитывая размеры рабочей части аэродинамической трубы, был выбран максимально возможный из условий загромождения потока масштаб макета 1:100.

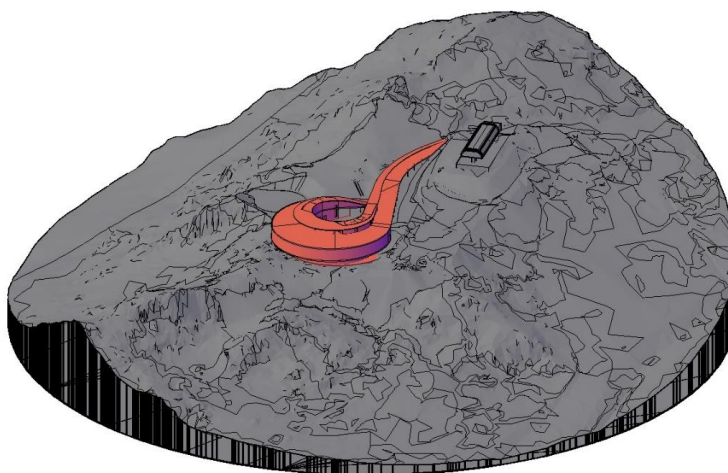


Рис. Согласованная трехмерная модель исследуемого объекта для изготовления физической модели

По согласованной модели Заказчиком спроектирована и изготовлена физическая модель изготовлена из листового ПВХ.

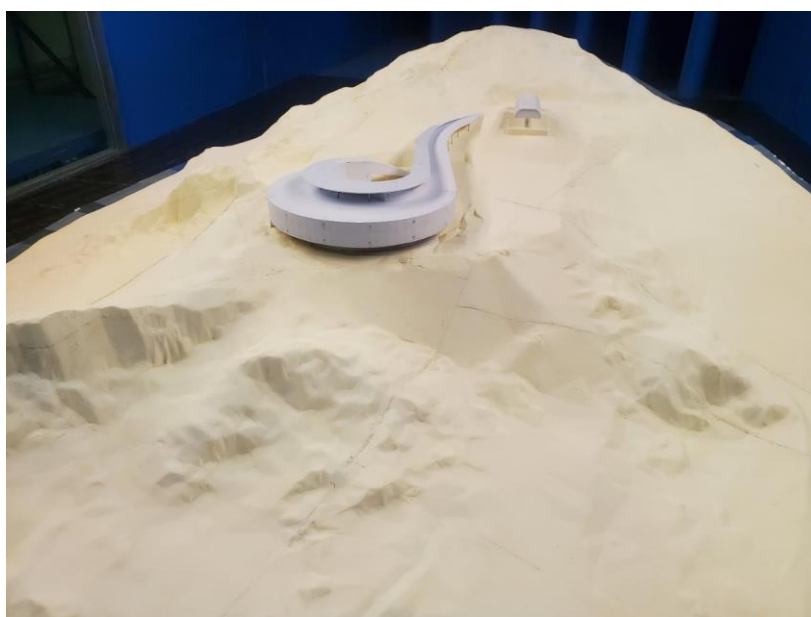


Рис. Модель исследуемого объекта в аэродинамической трубе

## 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.

### Калибровка датчиков давления

Калибровка выполнялась стандартным методом путем проведения "эталонных" экспериментов в аэродинамической установке AeroLab.

Эталонным прибором является дифференциальный цифровой манометр ЭКО-ИНТЕХ ДМЦ-01М (рис. 6.4). Предел основной допускаемой абсолютной погрешности измерений, не более  $\pm(1+0,005\Delta P)$  Па. В результате калибровки были получена градуировочная зависимость для 77 датчиков.

## Результаты испытаний

Измеренное с помощью тензо-датчиков давление на поверхности модели исследуемого объекта в дренажных точках (Приложение Б) позволяет судить о распределении по фасадам объекта аэродинамического давления при 24 углах атаки потока воздуха от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с шагом  $15^\circ$ .

Ниже представлены средние, максимальные и минимальные значения аэродинамических коэффициентов для каждой дренажной точки модели.

В таблице приведены расчетные значения пиковых ветровых давлений, полученных на основе определенных экспериментально аэродинамических коэффициентов и определенных численно коэффициентов орографии местности. В табл. представлены соответствующие пиковые значения аэродинамических коэффициентов, (обезразмеренных ветровых давлений).

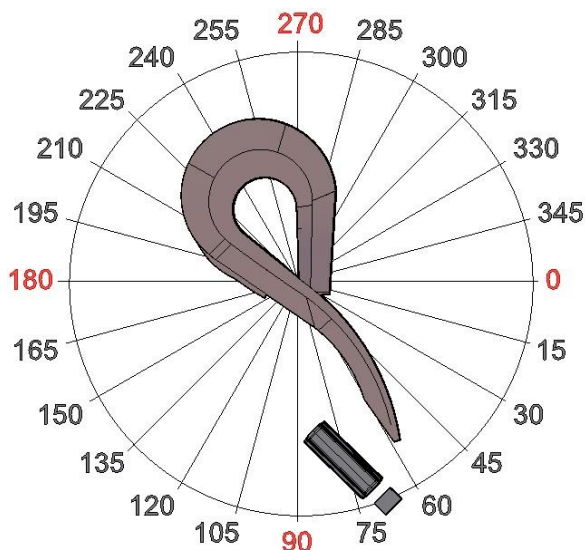


Рис. Направление набегающего потока при проведении экспериментальных исследований

Таблица. Пиковые (максимальные и минимальные среди всех направлений ветра) значения аэродинамических коэффициентов давления в контрольных точках на поверхности фасадов исследуемого объекта

№	$C_{p,max}$	$C_{p,min}$	№	$C_{p,max}$	$C_{p,min}$	№	$C_{p,max}$	$C_{p,min}$
<b>1</b>	0.65	-1.59	<b>27</b>	0.03	-0.86	<b>52</b>	0.33	-1.41
<b>2</b>	0.35	-1.77	<b>28</b>	0.44	-0.99	<b>53</b>	0.33	-1.39
<b>3</b>	0.83	-1.16	<b>29</b>	1.26	-1.23	<b>54</b>	0.29	-1.42
<b>4</b>	0.99	-0.86	<b>30</b>	0.75	-1.28	<b>55</b>	0.11	-1.49
<b>5</b>	0.74	-1.18	<b>31</b>	0.73	-1.49	<b>56</b>	0.56	-1.54
<b>6</b>	0.2	-1.28	<b>32</b>	0.74	-1.65	<b>57</b>	0.21	-1.32
<b>7</b>	0.11	-1.29	<b>33</b>	0.49	-1.08	<b>58</b>	0.32	-1.11
<b>8</b>	0.26	-0.97	<b>34</b>	0.37	-0.9	<b>59</b>	1.08	-0.78
<b>9</b>	0.51	-1.42	<b>35</b>	0.18	-0.76	<b>60</b>	0.04	-1.3
<b>10</b>	0.6	-1.14	<b>36</b>	0.39	-1.2	<b>61</b>	0.6	-1.21
<b>11</b>	0.67	-1.88	<b>37</b>	0.5	-1.45	<b>62</b>	-0.02	-1.15
<b>12</b>	0.74	-1.95	<b>38</b>	1.03	-1.64	<b>63</b>	0.12	-1.46
<b>13</b>	0.89	-1.23	<b>39</b>	0.21	-2.5	<b>64</b>	-0.02	-1.6
<b>14</b>	0.84	-0.95	<b>40</b>	0.64	-1.3	<b>65</b>	0.01	-1.77
<b>15</b>	0.94	-1.09	<b>41</b>	-0.02	-1.51	<b>66</b>	0.05	-1.71
<b>16</b>	0.54	-1.19	<b>42</b>	0.36	-1.22	<b>67</b>	0.01	-1.48
<b>17</b>	0.37	-1.55	<b>43</b>	0.25	-1.2	<b>68</b>	0.03	-1.44
<b>18</b>	0.64	-1.63	<b>44</b>	0.36	-1.35	<b>69</b>	-0.06	-1.44
<b>19</b>	0.34	-1.38	<b>45</b>	0.07	-1.42	<b>70</b>	0.11	-1.39
<b>20</b>	0.23	-1.27	<b>46</b>	0.6	-0.85	<b>71</b>	-0.03	-1.39
<b>21</b>	0.25	-1.19	<b>47</b>	0.76	-1.17	<b>73</b>	0.13	-1.53
<b>22</b>	0.36	-1.18	<b>48</b>	1.12	-1.11	<b>74</b>	0.01	-1.63
<b>23</b>	0.55	-0.99	<b>49</b>	0.61	-1.52	<b>75</b>	0.14	-1.62
<b>24</b>	0.37	-1.13	<b>50</b>	0.65	-1.62	<b>76</b>	0.11	-1.23
<b>25</b>	0.26	-1.22	<b>51</b>	0.35	-1.54	<b>77</b>	0.11	-1.44
<b>26</b>	0.09	-1.41						

Таблица Расчетные пиковые (максимальные и минимальные среди всех направлений ветра) ветровые давления в контрольных точках на поверхности фасадов исследуемого объекта (коэффициент корреляции  $v_{+(-)} = 1$ )

№	$P_{max,env}$ ( $w_+$ ), Па	$P_{min,env}$ ( $w_-$ ), Па	№	$P_{max,env}$ ( $w_+$ ), Па	$P_{min,env}$ ( $w_-$ ), Па	№	$P_{max,env}$ ( $w_+$ ), Па	$P_{min,env}$ ( $w_-$ ), Па
1	647	-924	27	30	-2 623	52	357	-5 084
2	458	-5 343	28	100	-283	53	357	-5 050
3	2 072	-2 095	29	319	-7 047	54	48	-2 004
4	5 672	-887	30	678	-7 334	55	194	-4 865
5	2 525	-1 253	31	964	-8 537	56	821	-1 689
6	532	-3 374	32	736	-4 413	57	55	-2 535
7	179	-404	33	1 301	-2 359	58	154	-471
8	98	-5 557	34	2 059	-963	59	333	-208
9	129	-8 136	35	614	-327	60	16	-1 613
10	326	-4 027	36	1 021	-6 875	61	152	-423
11	899	-10 771	37	670	-8 308	62	-4	-1 504
12	1 783	-5 317	38	279	-9 396	63	20	-1 071
13	4 952	-1 085	39	99	-4 000	64	-3	-967
14	5 008	-1 158	40	120	-1 318	65	2	-10 141
15	3 208	-1 174	41	-16	-8 651	66	8	-5 835
16	717	-6 818	42	104	-6 990	67	2	-5 391
17	349	-8 881	43	71	-2 659	68	5	-5 187
18	213	-9 339	44	73	-7 735	69	-10	-5 187
19	105	-2 944	45	14	-1 496	70	18	-3 328
20	66	-1 547	46	188	-1 937	71	-5	-2 835
21	271	-3 722	47	173	-1 104	73	22	-2 104
22	287	-1 142	48	283	-6 360	74	4	-5 423
23	159	-1 813	49	3 394	-1 411	75	23	-9 282
24	108	-2 500	50	1 566	-9 282	76	18	-395
25	75	-6 990	51	348	-8 823	77	18	-8 250
26	18	-1 327						



## 5. Сопоставление пиковых ветровых давлений по результатам математического и физического моделирования

В данном разделе представлено сопоставление пиковых ветровых давлений, определённых по результатам:

1. Полного математического (численного) моделирования.
2. Совмещенного подхода – аэродинамические коэффициенты из физического (экспериментального) моделирования, коэффициенты орографии местности из математического (численного) моделирования.

Таблица 5.1. Сопоставление пиковых ветровых давлений в характерных зонах Объекта

Зона	Контрольные точки	$P_{max,env}(w_+)$ , Па		$P_{min,env}(w_-)$ , Па	
		Численное моделирование	Физическое моделирование	Численное моделирование	Физическое моделирование
1	8	540	98	-5 983	-5 557
	28		100		-283
2	9	624	129	-5 543	-8 136
	29		319		-7 047
3	10	975	326	-4 687	-4 027
	30		678		-7 334
4	11	1 194	899	-6 739	-10 771
	31		964		-8 537
5	12	1 400	1 783	-7 486	-5 317
	32		736		-4 413
6	13	3 578	4 952	-5 843	-1 085
	14		5 008		-1 158
	33		1 301		-2 359
	34		2 059		-963
7	15	4 128	3 208	-5 839	-1 174
	35		614		-327
8	16	2 552	717	-5 981	-6 818
	36		1 021		-6 875
9	17	365	349	-7 467	-8 881
	37		670		-8 308
10	18	376	213	-10 157	-9 339
	38		279		-9 396
12	19	281	105	-10 391	-2 944
	39		99		-4 000
13	20	455	66	-7 264	-1 547
14	21	536	271	-2 946	-3 722
	40		120		-1 318
15	22	1 044	287	-3 429	-1 142
	41		-16		-8 651
16	23	979	159	-4 344	-1 813
	42		104		-6 990
17	24	507	108	-4 532	-2 500
	43		71		-2 659

18	25	326	75	-4 192	-6 990
	44		73		-7 735
20	26	365	18	-3 279	-1 327
	45		14		-1 496
21	27	470	30	-4 771	-2 623
22	46	398	188	-4 207	-1 937
23	47	509	173	-4 049	-1 104
	48		283		-6 360
24	49	635	3 394	-5 361	-1 411
25	50	542	1 566	-5 474	-9 282
28	53	524	357	-2 962	-5 050
29	54	75	48	-3 642	-2 004
30	55	163	194	-3 823	-4 865
	56		821		-1 689
31	57	399	55	-3 465	-2 535
	58		154		-471
32	59	212	333	-3 170	-208

Значения пиковых ветровых давлений, определенные по результатам математического и физического моделирования (с уч. коэффициента орографии местности, определенного численно), существенно отличаются.

Причины отличий заключаются в различных постановках и допущениях, применяемых при моделировании:

- разный масштабный фактор (макет для физического моделирования выполнен в масштабе 1:100, в математическом моделировании использовался реальный масштаб 1:1);
- разные модели (учет рельефа и лесных массивов в радиусе 1.5 км в математическом моделировании и 0.15 км в физическом моделировании);
- разные способы учета турбулентности ветра и, как следствие, разные подходы к определению пиковых давлений.

## Выводы и рекомендации

По результатам выполненной работы «Расчетно-экспериментальные исследования ветровых воздействий для Объекта: «Всесезонный курорт «Манжерок», панорамный ресторан» можно сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. На основе анализа и обобщения исходных данных разработаны физическая и численная модели ветровой аэродинамики Объекта.

2. В результате проведенных на основе *математического (численного) моделирования* многовариантных расчетных исследований аэродинамики Объекта при 25-ти направлениях ветра с учетом рельефа местности и лесных массивов выявлено следующее:

- высотное расположение объекта (фактически на хребте горы) и лесные массивы на склонах оказывают существенное влияние на его аэродинамику. Коэффициенты орографии, необходимые для корректного перехода от аэродинамических коэффициентов, определенных по результатам физического моделирования, к пиковым ветровым давлениям, достигают значения 3.38. Такой коэффициент повышает ветровые давления в 11.4 раз по сравнению с несовершенным нормативным подходом, вовсе не учитывающем рельеф. Однако для большей части направлений ветра коэффициент орографии не превышает 1. Заметим, что учет лесных массивов существенно уменьшает скорости ветра на высоте ресторана и, как следствие, значения коэффициента орографии и пиковых ветровых давлений (от 40 до 1.5 раз) по сравнению со случаем без учета лесных массивов.

3. По результатам проведенного *физического (экспериментального) моделирования* аэродинамики исследуемого объекта были определены средние, максимальные и минимальные значения аэродинамических коэффициентов в 77 дренажных точках на поверхности гостиницы для 24-х направлений ветра. На основе полученных данных и результатов численного моделирования коэффициентов орографии местности были определены расчетные пиковые ветровые давления:

4.

5. Нельзя не отметить, что полученные по результатам как математического, так и физического моделирования расчетные пиковые ветровые давления достаточно велики. Такой результат диктуется двумя факторами:

- особенностями нормирования ветровых районов согласно СП 20 [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Район III (Приложение Е, карта 2) охватывает тысячи километров, включая равнины, низины и горы, ветровые режимы которых кардинально различны;

- крайне неблагоприятным с точки зрения ветровых нагрузок расположением Объекта – фактически на хребте горы, возвышаясь на многие сотни метров над всей окружающей местностью.

6. Значения пиковых ветровых давлений, определенные по результатам математического и физического моделирования (с уч. коэффициента орографии местности, определенного численно), существенно отличаются.