



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
**СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

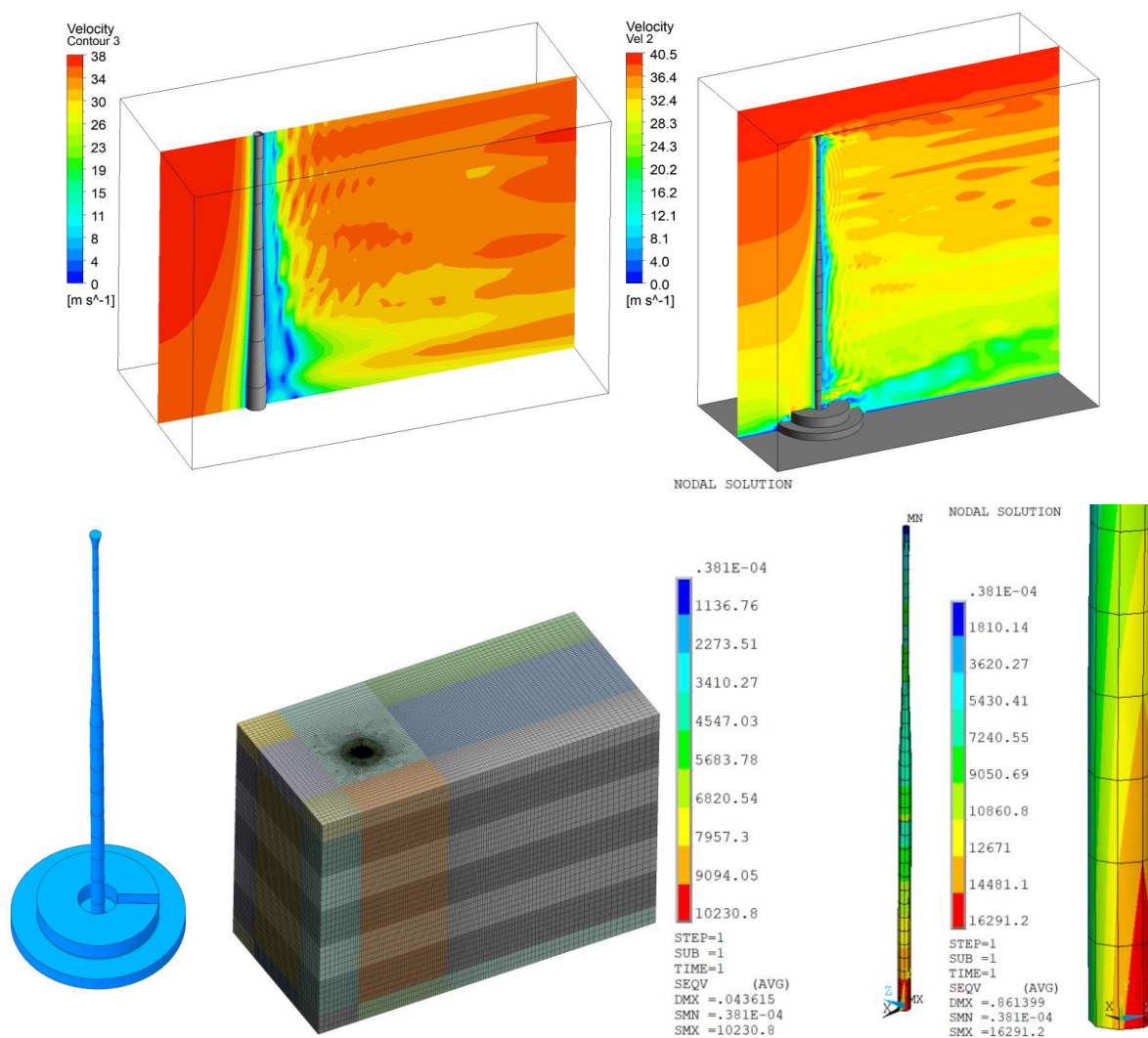
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

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

ОТЧЕТ о НИР

по теме:

«Комплексные аэродинамические исследования флагштоков на территории ГТС на
береговой линии Парка 300-летия
г. Санкт-Петербурга»



МОСКВА 2021

1. Исходные данные. Постановка задач

Постановка задач расчетных исследований

В соответствии с техническим заданием были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) анализ и обобщение проектной документации Объекта, постановка задач расчетных исследований;
- 2) разработка и верификация расчетной конечноэлементной модели флагштоков;
- 3) расчет собственных частот и форм колебаний флагштоков;
- 4) определение ветровой нагрузки на флагштоки, приходящейся от флага, на основе нормативных методик;
- 5) разработка и верификация трехмерных аэродинамических расчетных моделей флагштоков с учетом сооружений Базы водных видов спорта;
- 6) определение аэродинамических коэффициентов и основной ветровой нагрузки, действующей на флагшток;
- 7) определение критических скоростей ветра и оценка возможности возникновения эффектов аэродинамической неустойчивости, в частности, галопирования и вихревого возбуждения на основе нормативных и модифицированных инженерных (нормативных) методик;
- 8) определение ветровых нагрузок на флагштоки, возникающих при резонансном вихревом возбуждении, на основе модифицированной инженерной (нормативной) методики;
- 9) выдача рекомендаций по назначению ветровых нагрузок и требования к проектированию Объекта.

Площадка строительства, рельеф и застройка объекта

Объект строительства (База водных видов спорта) обустроен на трех гидротехнических сооружениях (далее ГТС), в центре которых расположены исследуемые в данной работе флагштоки, и находится в прибрежной зоне Финского залива в непосредственной близости от территории «Парка 300-летия Санкт-Петербурга». Пляж расположен в северо-западной части Санкт-Петербурга на границе Приневской низменности в северной части Невской губы. С севера парк ограничен Приморским проспектом и Приморским шоссе, с востока — Яхтенной улицей. Вдоль береговой линии проложен променад. В радиусе видимости парка возведен первый в Санкт-Петербурге небоскреб – Лахта-Центр.



Рис. Схема планировочной организации земельного участка [1]

Рассматриваемая территория характеризуется умеренным избыточно-влажным климатом с неустойчивым режимом погоды и, в соответствии со СП 131.13330, относится ко II В подрайону по климатическому районированию России и II типу местности по характеру и степени увлажнения.

На климатические условия рассматриваемой территории оказывают влияние внутренние водоемы (Финский залив и Ладожское озеро). В целом, климат характеризуется как близкий к морскому, умеренно холодный, влажный, с умеренно теплым влажным летом и довольно продолжительной умеренно холодной зимой. Ветры южных, юго-западных и западных направлений приносят теплый и влажный атлантический воздух. Смена различных воздушных масс является причиной неустойчивой, изменчивой погоды.

Климат характеризуется четырехсезонной структурой. Среднегодовая температура воздуха составляет 5,4 градуса. Самыми холодными месяцами являются январь и февраль, их среднемесячная температура составляет минус 8,0-7,9 градусов. Самым теплым месяцем является июль со средней температурой воздуха 17,1 градуса. Абсолютный максимум температуры составляет 37 градусов.

Большое влияние на климат оказывают ветры, которые приносят в город воздух часто из областей с другими климатическими условиями. Преобладающими являются западные и юго-западные ветры, которые приносят в город теплый и влажный атлантический воздух, чем и объясняется морской климат Санкт-Петербурга.



Рис. Карта местности возле площадки строительства (<https://yandex.ru/maps>)

Рельеф участка местности ровный и его перепады совершенно незначительны по сравнению с высотой исследуемых флагштоков.

Согласно СП 20.13330.2016 участок строительства относится к **II** ветровому району (нормативное ветровое давление – 300 Па) и **II** гололедному району.

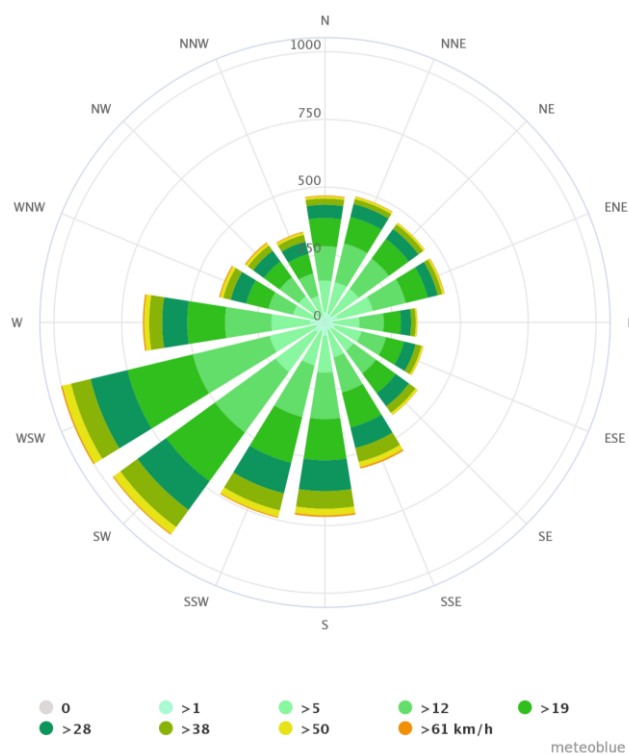


Рис. Роза ветров в г. Санкт-Петербург, ч/год (<https://www.meteoblue.com>)

Краткая характеристика исследуемого Объекта

Компоновочными планировочными решениями схемы генерального плана участка предусматривается создание трех гидротехнических сооружений (ГТС) в акватории Финского залива, способных полностью погасить расчетные штормовые волны. ГТС запроектированы круглыми в плане диаметром 50 метров. Для защиты пляжа от волнового воздействия по контуру ГТС запроектировано устройство волногасящей призмы из природного камня большого диаметра.

На трёх ГТС предусмотрено строительство Базы водных видов спорта. Проектируемая База водных видов спорта предназначена для размещения объектов технического обеспечения водных видов спорта.

В центре каждого ГТС предусмотрено устройство металлических флагштоков, представляющих собой стержень высотой 175 м кольцевого переменного сечения (от 3900 мм в основании до 1800 мм на отметке 170 м относительно уровня верха фундамента), омоноличенный с ж.б. фундаментом в основании.

В верхней части флагштока предусмотрен поворотный металлический оголовок конусного кольцевого сечения (диаметр 1800 мм на отметке 170,0 м и 3420 мм на отметке 175 м от верха фундамента). Для возможности обслуживания механизмов поворотной части предусмотрены площадки по периметру и сверху оголовка.

Каждая секция должна быть изготовлена с установленными внутри лестницей и площадкой (расстояние от верха площадки до оси стыка принято равным 1200 мм для возможности оформления болтового соединения без устройства дополнительных СВСиУ). Площадки в каждой секции поступают с установленным перильным ограждением. Конструктивно площадки выполнены из швеллера 12П и приваренного сверху сварного решетчатого настила. Ограждение выполнено из уголка сечением 70х70х6.

Несущие конструкции лестницы выполнены из уголка сечением 70х70х6. Ступени лестницы выполнены из арматуры диаметром 20 мм.

Верхняя (поворотная) секция выполнена в виде конуса из архитектурных соображений. Каркас секции изготовлен из прямоугольных труб 70х50х3 и обтянут снаружи листом толщиной 8 мм. Крыша секции изготовлена из швеллера 10П и обтянута листом толщиной 12 мм. Поворотный круг секции выполнен из листового металла толщиной 16 и 20 мм. Для возможности замены роликов (при эксплуатации) каждое колесо фиксируется к поворотному кругу подвижной секции на болтах и при помощи специальных кронштейнов. Ролики устанавливаются в вертикальной (для восприятия осевой силы и момента) и горизонтальной плоскостях (для восприятия горизонтальной силы).

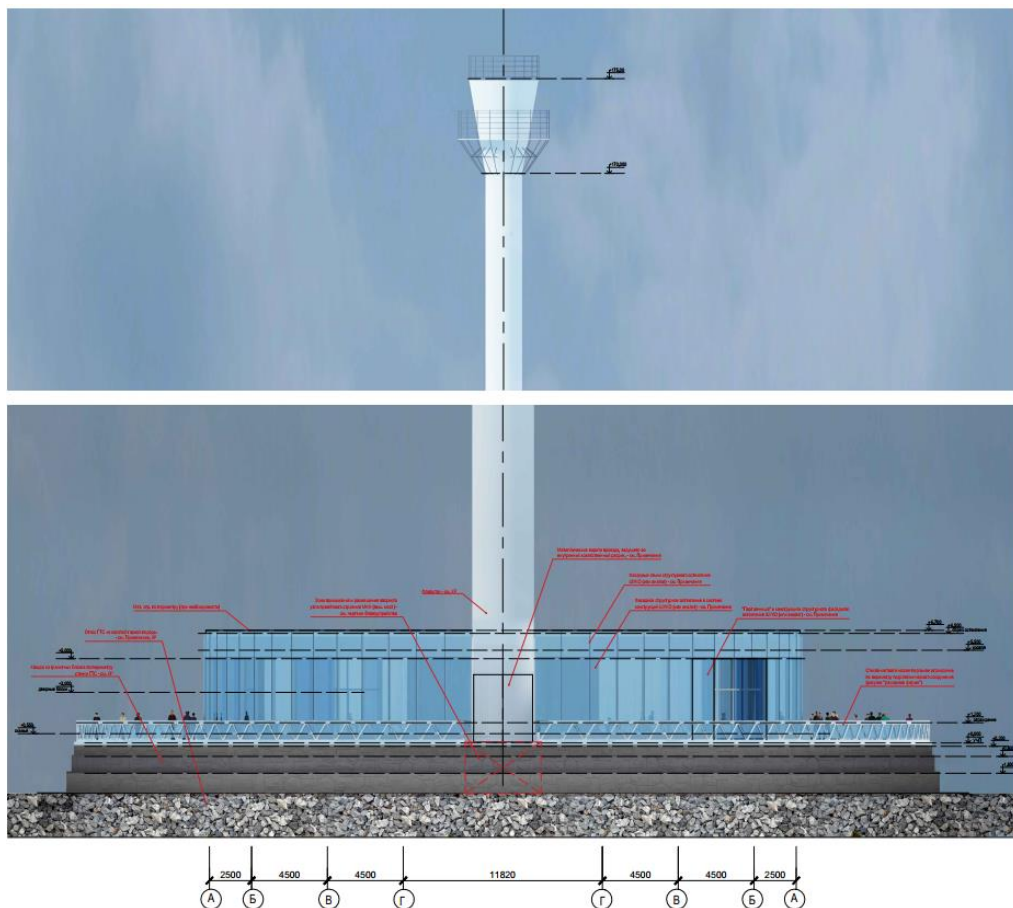


Рис. Рендеры Объекта

2. Определение собственных частот и форм колебаний флагштоков

Определение собственных частот и форм колебаний конструкций флагштока выполняется по верифицированному лицензионному программному комплексу ANSYS Mechanical, реализующему развитые схемы метода конечных элементов.

Собственные частоты и формы колебания сооружения вычислены с учетом массы от собственного веса конструкций и оборудования, без учета коэффициентов надежности по нагрузке и ответственности.

Расчетная динамическая модель флагштоков

Расчетная схема представляет собой вертикальный стержень переменного кольцевого сечения, жестко заземленный в основании. Ось Y направлена вдоль оси стержня. Точность стержневой модели достаточна для последующего применения полученных изгибных собственных частот и форм в инженерных оценках явлений аэроупругой неустойчивости, принимая во внимания степень приближенности последних.

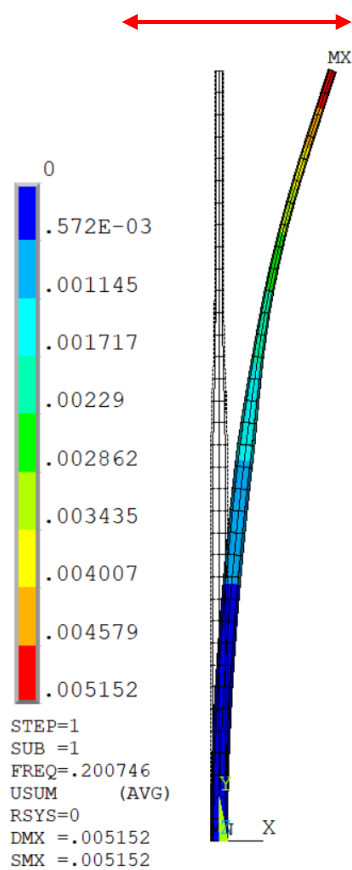
Конструкция флагштока замоделирована балочными конечными элементами типа BEAM188, реализующими гипотезы Тимошенко (с учетом поперечного сдвига). Сечения конечных элементов заданы согласно исходным данным и представляют собой кольцо. Для секций 1-9 и 15-18 сечение постоянно по высоте секции, для секций 10-14 – переменное. Шаг конечно-элементной сетки – 5 м.

Собственные частоты и формы колебаний конструкции флагштоков

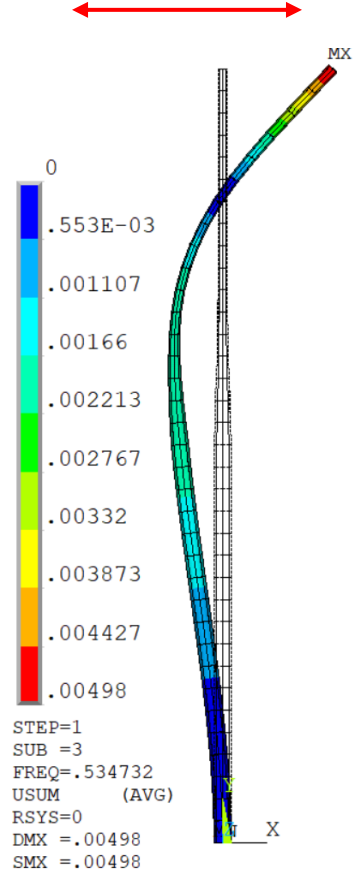
В таблице приведены первые 10 собственных частот колебаний флагштоков, а на рисунке показаны первые 8 собственные формы колебаний флагштоков. Также были определены собственные вектора перемещений секций в нормированном виде (максимальное перемещение (угол поворота) секции принимается равным 1.0) для последующих аэродинамических расчетов.

Таблица. Собственные частоты колебаний флагштока

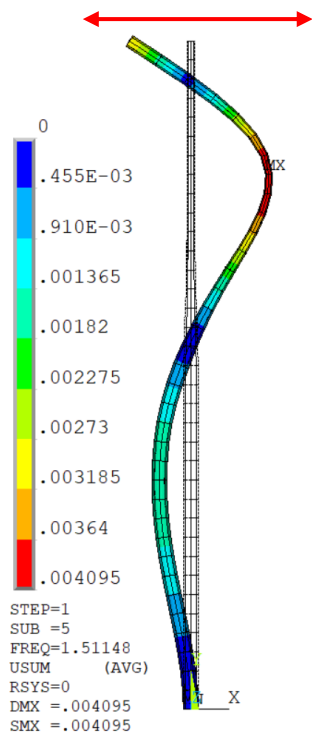
№ п/п	Частота, Гц	№ п/п	Частота, Гц
1, 2	0,201	11, 12	6,948
3, 4	0,535	13	7,567
5, 6	1,512	14, 15	9,682
7, 8	2,829	16	9,975
9, 10	4,711	17	11,171



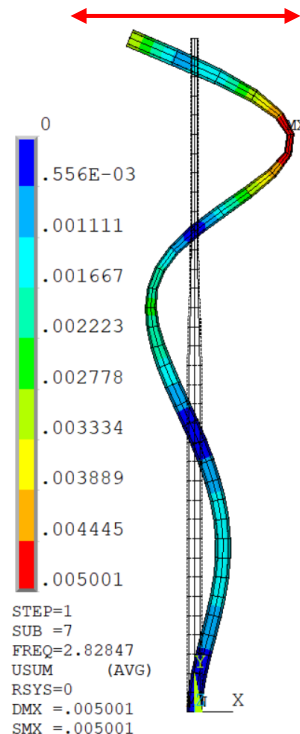
а) 1, 2-я формы колебаний
 $f_{1,2} = 0,201\text{Гц}$



б) 3, 4-я формы колебаний
 $f_{3,4} = 0,535\text{Гц}$



в) 5, 6-я формы колебаний
 $f_{5,6} = 1,512\text{Гц}$



г) 7, 8-я формы колебаний
 $f_{7,8} = 2,829\text{Гц}$

Рис. Собственные формы колебаний

3. Ветровая нагрузка на флагшток от флага

Ветровые нагрузки, определенные по данным отечественных справочников, дают чрезмерно завышенные значения, противоречащие физическому смыслу процесса и на порядок превышающие данные норм технически развитых стран. Причина такой ситуации заключается в том, что методика, предложенная в Руководстве под редакцией М.Ф. Барштейна, носит чисто умозрительный характер и не подтверждена никаким экспериментальными данными. Аэродинамический коэффициент, определенный по Атласу М. А. Березина и В. В. Катюшина, имеет совершенно неадекватное значение 0.952, соответствующее напору на полноценное здание. Ветровая нагрузка, определенная по нормам США, заслуживает наибольшего доверия, т.к. соответствующая методика была разработана на основе экспериментов при высоких скоростях ветра, характерных для строительных задач, и реальных размерах флагов, а не уменьшенных копиях в АДТ.

Рекомендуется для вариантного прочностного анализа флагштока использовать значения ветровых нагрузок от флага, определенные по Eurocode (78.8 кН), по AS-NZS 1170-2 (247.2 кН), по ANSI/NAAMM FP1001-07 (12.7 кН).

Имея в виду значительный опрокидывающий момент силы, возникающий от действия ветровой нагрузки на флагшток, приходящейся от флага (см. Приложение А), рекомендуется устроить систему автоматического спуска флага при существенных скоростях ветра. Рекомендуется так настроить систему, чтобы спуск флага автоматически происходил, если средняя скорость ветра превышает определенную критическую в течение 1 минуты на высоте 10 метров над водой.

В случае устройства автоматической системы спуска флага с указанными выше параметрами следует рассмотреть два расчетных случая на действие основной ветровой нагрузки:

1) расчетный ветровой напор на флагшток $\gamma_f w_0 = 420$ Па без учета ветровой нагрузки на флаг;

2) расчетный ветровой напор на флагшток $\gamma_f w_0 = \frac{1.25 \text{ кг/м}^3 \cdot (15 \text{ м/с})^2}{2} = 140.6$ Па с учетом ветровой нагрузки на флаг при расчетной скорости ветра 15 м/с. Если система автоматического спуска флага будет настроена на другую скорость ветра, то расчетный ветровой напор и ветровые нагрузки на флаг должны быть соответствующим образом пересчитаны.

4. Определение аэродинамических характеристик флагштоков

Определение аэродинамических характеристик для цилиндров с диаметрами 1.8 м и 3.9 м

Для создания расчетной сетки были использованы параметры, описанные в пункте 6.1.2. Рассматриваются два цилиндра диаметрами 1.8 м и 3.9 м и длиной 10 м (характерные сечения исследуемого флагштока). Задачи решаются в нестационарной постановке (URANS) с применением модели турбулентности $k - \omega$ SST. Рассматривается обтекание при скорости входного потока 30 м/с (характерная скорость ураганного ветра) и низким уровнем турбулентности (1%) во избежание получения нефизичных решений.

Для двух цилиндров был получен оптимальный шаг по времени, который был использован в дальнейших аэродинамических расчетах.

Расчетные аэродинамические модели флагштока и его характерных частей

Для определения ветровых нагрузок на флагшток были разработаны:

- расчетная аэродинамическая модель флагштока с учетом здания базы водных видов спорта и ГТС, но без учета флага (модель 1);
- дополнительно (для уточненных расчетов) были разработаны расчетные аэродинамические модели конических секций №10-14 (модель 2) и поворотной секции №18 (модель 3) (рис. 6.9-6.10).

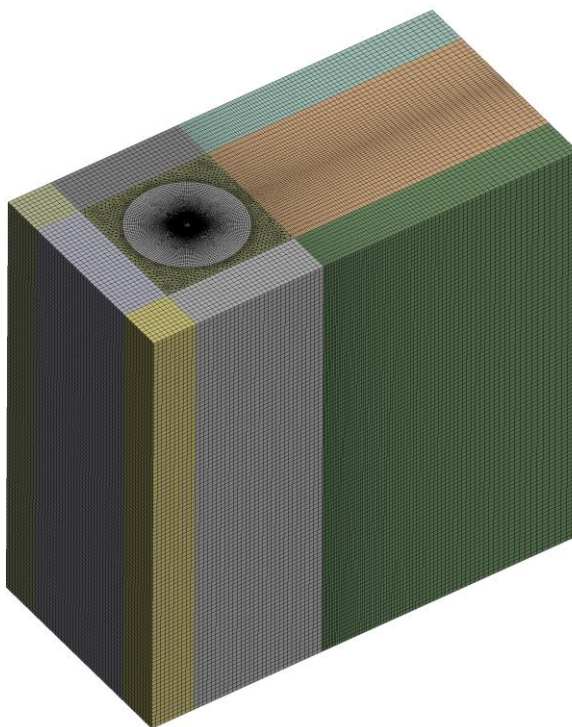
Параметры конечнообъемных сеток, моделей турбулентности и настройки решателя были приняты по результатам верификационных расчетов цилиндров.

Размеры расчетной области

Длина расчетной области вдоль потока – 200 м (флагшток находится на расстоянии 50 м от входного потока), ширина поперек потока – 100 м, высота – 200м.



а) геометрическая модель
флагштока (*модель 1*)



б) конечнообъемная сетка (общий вид)
(6.4 млн. КО)

Рис. Геометрическая модель (а) и конечнообъемная сетка (б)
расчетной *модели 1*

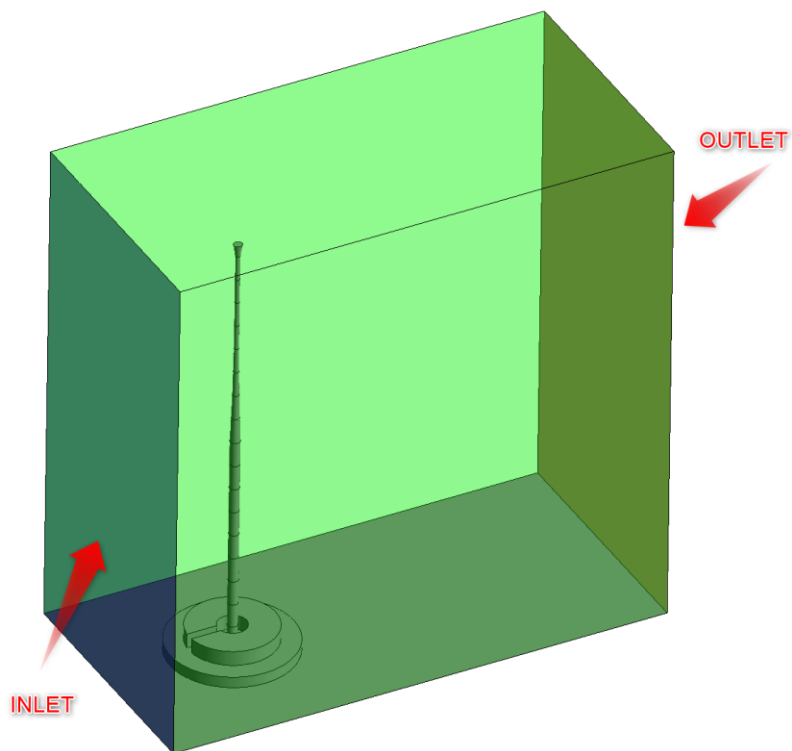


Рис. Расчетная аэродинамическая модель флагштока.

Результаты определения основных ветровых нагрузок на флажтоки

В данном разделе представлены результаты расчетов аэродинамических характеристик флажтока с учетом здания базы водных видов спорта и ГТС, но без учета флага, а также отдельных конических секций №10-14 и поворотной секций №18. В конце раздела представлены рекомендации по назначению ветровых нагрузок и аэродинамических коэффициентов C_x и C_y , основанные на консервативных оценках (C_x и C_y приняты согласно Eurocode) в силу отсутствия однозначности результатов в существующих экспериментальных исследованиях, нормативных данных и результатах математического (численного) моделирования.

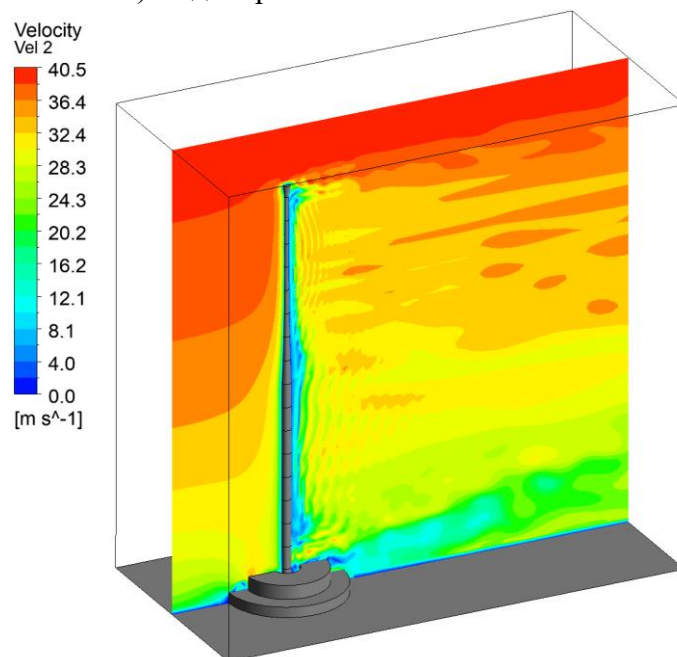


Рис. Изополя скоростей ветра [м/с] (*модель 1*) в моделируемый физический момент времени $t = 22$ с.

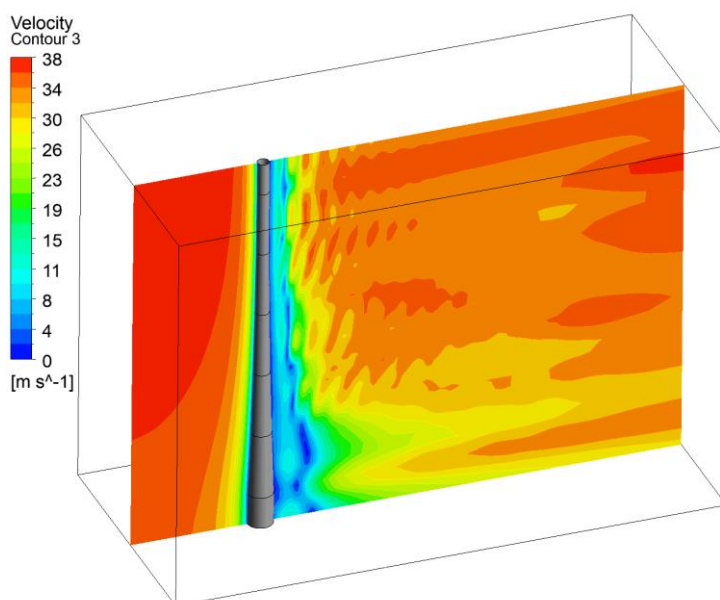


Рис. Изополя скоростей ветра [м/с] (*модель 2*) в моделируемый физический момент времени $t = 19$ с.

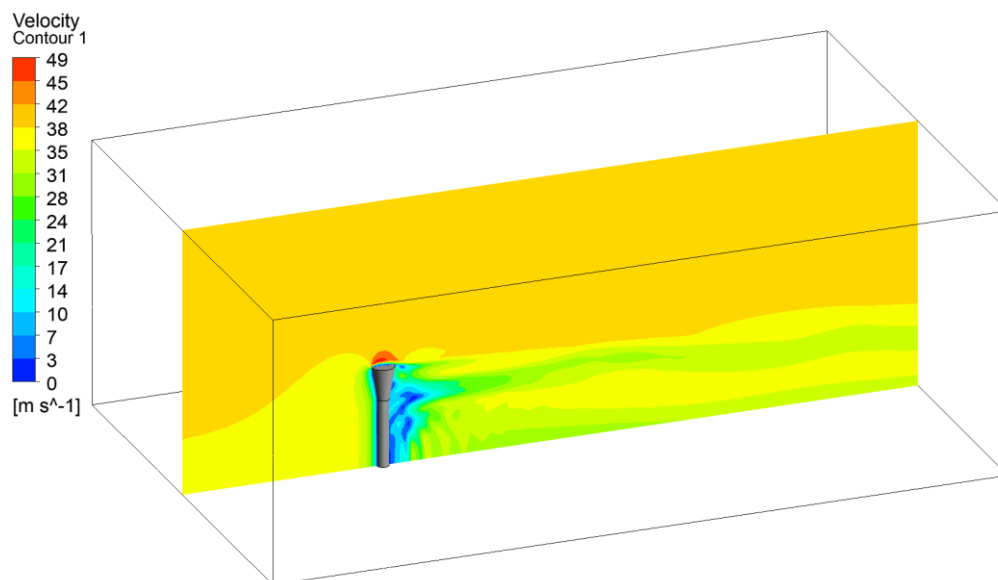


Рис. Исополя скоростей ветра [м/с] в горизонтальных (а, б) и вертикальном (в) сечениях поворотной секции №18 флажштока (модель 3) в моделируемый физический момент времени $t = 9$ с.

Таблица. Расчетные горизонтальные ветровые нагрузки (F_X , F_Y , кН) и аэродинамические коэффициенты, определенные по модели 1 (весь флажшток)

№ секции	$F_{X,ave}$	$F_{X,min}$	$F_{X,max}$	$C_{X,max}$	$F_{Y,ave}$	$F_{Y,min}$	$F_{Y,max}$	$C_{Y,max}$
1	0.10	-3.72	4.32	0.32	0.21	-2.19	4.24	0.32
2	10.27	6.81	16.85	0.91	0.31	-10.47	11.87	0.64
3	7.90	7.28	8.61	0.40	0.01	-1.84	1.70	0.09
4	9.25	9.12	9.43	0.40	-0.01	-1.73	1.74	0.07
5	10.30	10.05	10.54	0.41	-0.02	-3.82	3.82	0.15
6	11.07	10.75	11.26	0.41	-0.02	-4.67	4.66	0.17
7	11.07	10.90	11.26	0.39	-0.01	-3.80	3.78	0.13
8	11.03	10.56	11.44	0.38	0.00	-4.36	4.34	0.15
9	11.13	10.69	11.76	0.38	0.00	-3.44	3.41	0.11
10	9.76	9.30	10.15	0.35	-0.06	-1.52	1.46	0.05
11	8.21	7.88	8.55	0.35	0.03	-0.87	0.87	0.04
12	7.42	7.26	7.58	0.37	0.14	-0.82	1.11	0.05
13	7.00	6.80	7.20	0.40	0.08	-1.52	1.65	0.09
14	6.81	6.69	6.94	0.41	-0.06	-1.73	1.59	0.10
15	7.27	7.17	7.38	0.44	0.00	-2.08	2.07	0.12
16	7.18	7.11	7.39	0.43	0.00	-2.00	2.00	0.12
17	6.63	6.56	6.75	0.39	-0.01	-0.71	0.69	0.04
18	7.05	6.57	7.98	0.62	0.02	-3.10	2.68	0.24
Весь флажшток	149.05	143.37	156.68	-	0.68	-19.69	22.90	-
Сумма по секциям	149.45	137.77	165.40	-	0.59	-50.68	53.68	-
ν	1.00	1.04	0.95		1.15	0.39	0.43	

Таблица. Аэродинамические коэффициенты и расчетные горизонтальные силы от действия ветровой нагрузки на секции флажштока

№ секции	Расчетный ветровой напор 420 Па				Расчетный ветровой напор 140.6 Па			
	C_X	$F_X, \kappa H$	C_Y	$F_Y, \kappa H$	C_X	$F_X, \kappa H$	C_Y	$F_Y, \kappa H$
1	0.65	8.67	0.23	1.52	0.61	2.71	0.20	0.45
2	0.66	12.27	0.25	2.33	0.62	3.86	0.20	0.62
3	0.67	14.42	0.26	2.83	0.63	4.54	0.20	0.72
4	0.67	16.03	0.27	3.22	0.63	5.05	0.20	0.80
5	0.67	17.35	0.28	3.55	0.64	5.47	0.20	0.86
6	0.68	18.48	0.28	3.82	0.64	5.83	0.20	0.92
7	0.68	19.48	0.28	4.07	0.64	6.15	0.20	0.98
8	0.68	20.38	0.29	4.30	0.64	6.44	0.21	1.04
9	0.68	21.20	0.29	4.50	0.64	6.70	0.21	1.10
10	0.68	19.63	0.28	4.03	0.64	6.19	0.20	0.97
11	0.66	16.04	0.25	3.01	0.62	5.04	0.20	0.81
12	0.65	13.31	0.22	2.28	0.61	4.16	0.20	0.69
13	0.64	11.50	0.20	1.82	0.59	3.58	0.20	0.60
14	0.63	10.69	0.20	1.69	0.59	3.32	0.20	0.57
15	0.63	10.65	0.20	1.69	0.59	3.31	0.20	0.56
16	0.63	10.88	0.20	1.72	0.59	3.38	0.20	0.58
17	0.63	11.10	0.20	1.75	0.59	3.45	0.20	0.59
18	0.66	8.57	0.25	1.60	0.62	2.69	0.20	0.43

Таблица. Сводные расчетные горизонтальные силы и опрокидывающие моменты, приходящиеся на фундамент от действия ветровой нагрузки на флажток (без учета флага)

	$F_X, \kappa H$	$F_Y, \kappa H$	$F_R, \kappa H$	$M_X, \kappa H \cdot м$	$M_Y, \kappa H \cdot м$	$M_R, \kappa H \cdot м$
Расч. ветр. напор 420 Па	260.7	49.7	265.4	4059.5	22042.8	22413.5
Расч. ветр. напор 140.6 Па	81.8	13.3	82.9	1133.1	6906.3	6998.7

Оценки аэроупругой неустойчивости

Галопирование

Оценка по нормативной методике

Таблица 4.1. Значения критических скоростей $V_{cr,g}$ для первых 6-ти собственных форм при различных значениях коэффициента конструкционного демпфирования δ_s

δ_s	$V_{cr,g}$, м/с					
	$f_{1,2}=0.201$ Гц		$f_{3,4}=0.535$ Гц		$f_{5,6}=1.512$ Гц	
	$m_{e,1,2}=1\,234$ кг/м		$m_{e,3,4}=2\,034$ кг/м		$m_{e,5,6}=1\,514$ кг/м	
	$D=1.8$ м	$D=3.9$ м	$D=1.8$ м	$D=3.9$ м	$D=1.8$ м	$D=3.9$ м
0.01	3.5	1.6	15.5	7.1	32.5	15.0
0.02	7.1	3.3	31.0	14.3	65.1	30.0
0.03	10.6	4.9	46.4	21.4	97.6	45.1
0.04	14.1	6.5	61.9	28.6	130.2	60.1
0.05	17.6	8.1	77.4	35.7	162.7	75.1
0.06	21.2	9.8	92.9	42.9	195.3	90.1
0.07	24.7	11.4	108.3	50.0	227.8	105.2
0.08	28.2	13.0	123.8	57.1	260.4	120.2
0.09	31.8	14.7	139.3	64.3	292.9	135.2
0.10	35.3	16.3	154.8	71.4	325.5	150.2

Также были проведены оценки галопирования по другим методикам.

Анализ результатов и выводы

Оценки возможности возникновения галопирования по нормативной и обобщенной инженерной методике показали, что для исследуемых флажтоков возможно возникновение явления галопирования при экстремальном обледенении. Расчетные скорости ветра, при которых могут возникать аэроупругие колебания при некоторых допущениях, так малы, что экстремальное обледенения флажтока может привести к галопированию.

Однако, неопределенность с пространственной конфигурацией/толщиной слоя льда и значительный «произвол» в инженерно-нормативных методиках (в частности, условия возникновения галопирования являются необходимыми, но не достаточными) делают столь «пессимистичный» вывод, вполне вероятно, и не реализуемым в натуре.

Вихревое возбуждение

В рамках оценки вихревого возбуждения была использована модифицированная методика, учитывающая изменение профиля ветра и диаметра секций по высоте, а также учитывающая зависимость аэродинамических коэффициентов и чисел Струхала от чисел Рейнольдса.

Таблица. Критические скорости ветра $V_{cr,i}$ [м/с] для каждой секции и первых изгибных собственных частот при $k_v = 0.9$.

№ секции	$f_{1,2}=0,201$, Гц	$f_{3,4}=0,535$, Гц	$f_{5,6}=1,512$, Гц	$f_{7,8}=2,82$, Гц 9	$f_{9,10}=4,711$, Гц	$f_{11,12}=6,948$, Гц	V_{max} , м/с
1	2.96	8.54	24.12	45.14	75.16	110.85	23.42
2	2.96	8.54	24.12	45.14	75.16	110.85	27.61
3	2.96	8.54	24.12	45.14	75.16	110.85	29.81
4	2.96	8.54	24.12	45.14	75.16	110.85	31.35
5	2.96	8.54	24.12	45.14	75.16	110.85	32.56
6	2.96	8.54	24.12	45.14	75.16	110.85	33.55
7	2.96	8.54	24.12	45.14	75.16	110.85	34.40
8	2.96	8.54	24.12	45.14	75.16	110.85	35.15
9	2.96	8.54	24.12	45.14	75.16	110.85	35.81
10	2.81	7.71	21.79	40.76	67.88	100.11	36.42
11	2.53	5.34	17.63	32.98	54.93	81.01	36.97
12	2.23	4.78	14.51	27.15	45.21	66.68	37.48
13	1.91	4.42	12.43	23.26	38.74	57.13	37.95
14	1.75	4.23	10.59	21.32	35.50	52.36	38.39
15	1.71	4.19	10.10	20.83	34.69	51.16	38.80
16	1.71	4.19	10.10	20.83	34.69	51.16	39.19
17	1.71	4.19	10.10	20.83	34.69	51.16	39.56
18	2.44	5.07	16.24	30.38	50.59	74.61	39.83

Таблица 4.2. Критические скорости ветра $V_{cr,i}$ [м/с] для каждой секции и первых изгибных собственных частот при $k_v = 1.1$.

№ секции	$f_{1,2}=0,201$, Гц	$f_{3,4}=0,535$, Гц	$f_{5,6}=1,512$, Гц	$f_{7,8}=2,82$, Гц 9	$f_{9,10}=4,711$, Гц	$f_{11,12}=6,948$, Гц	V_{max} , м/с
1	3.45	10.43	29.48	55.17	91.86	135.49	23.42
2	3.45	10.43	29.48	55.17	91.86	135.49	27.61
3	3.45	10.43	29.48	55.17	91.86	135.49	29.81
4	3.45	10.43	29.48	55.17	91.86	135.49	31.35
5	3.45	10.43	29.48	55.17	91.86	135.49	32.56
6	3.45	10.43	29.48	55.17	91.86	135.49	33.55
7	3.45	10.43	29.48	55.17	91.86	135.49	34.40
8	3.45	10.43	29.48	55.17	91.86	135.49	35.15
9	3.45	10.43	29.48	55.17	91.86	135.49	35.81
10	3.27	9.42	26.63	49.82	82.96	122.35	36.42
11	2.94	7.21	21.55	40.31	67.13	99.01	36.97
12	2.68	5.57	17.74	33.18	55.26	81.50	37.48
13	2.34	5.14	15.20	28.43	47.35	69.83	37.95
14	2.14	4.92	13.93	26.06	43.39	63.99	38.39
15	2.09	4.86	13.61	25.46	42.40	62.53	38.80
16	2.09	4.86	13.61	25.46	42.40	62.53	39.19
17	2.09	4.86	13.61	25.46	42.40	62.53	39.56
18	2.82	6.12	19.85	37.13	61.83	91.19	39.83

Выводы и рекомендации

По результатам выполненной НИР «Комплексные аэродинамические исследования флагштоков на территории ГТС на береговой линии Парка 300-летия г. Санкт-Петербурга» можно сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. На основе анализа и обобщения исходных данных разработана расчетная динамическая конечноэлементная модель флагштоков, по которой были определены значимые собственные частоты и формы колебаний конструкции.

2. Выполнен анализ нормативных документов разных стран (Eurocode, AS-NZS 1170-2, ANSI/NAAMM FP1001-07) и отечественных справочных данных в части назначения ветровых нагрузок от флагов. Рекомендуется для прочностного анализа флагштока использовать значения ветровых нагрузок от флага, определенные по Eurocode.

Имея в виду значительный опрокидывающий момент силы, возникающий от действия ветровой нагрузки от флага, **рекомендуется** реализовать систему автоматического спуска флага при существенных скоростях ветра.

3. Проведена верификация и валидация расчетных аэродинамических моделей цилиндров на основе нормативных данных и опубликованных научных исследований. Определены оптимальные настройки численной модели, в т.ч. размеры конечнообъемной сетки и временной шаг.

4. На основании анализа и обобщения исходных данных и проведенной ранее верификации и валидации на примере цилиндров, была разработана расчетная трехмерная численная модель (CFD-модель) аэродинамики флагштока с учетом здания Базы водных видов спорта и без учета флага.

5. По результатам проведенных аэродинамических исследований на основе разработанной CFD-модели флагштока **рекомендуется**:

Для прочностного анализа стойки и фундамента флагштоков для основных ветровых нагрузок следует использовать значения аэродинамических коэффициентов согласно нормативным данным Eurocode и / или СП «в запас», но с учетом коэффициента корреляции, который следует принять (по результатам расчетов).

В прочностных расчетах следует учесть пульсационную составляющую ветровой нагрузки, вызванную атмосферной турбулентностью и динамическими характеристиками конструкции.

Сравнительный анализ спектров частот показал, что при ураганном ветре наблюдается близость основных энергонесущих частот опрокидывающего момента к первым двум собственным частотам колебаний флагштока. Однако амплитуды момента M_y малы, поэтому близость частот не представляет опасности.

6. Выявлено, что для исследуемых флагштоков необходима оценка возможности проявления следующих эффектов аэроупругой неустойчивости: галопирования и вихревого возбуждения.

7. Оценки возможности возникновения галопирования по нормативной и обобщенной инженерной методике показали, что для исследуемых флагштоков возможно возникновение явления галопирования при экстремальном обледенении. Расчетные скорости ветра, при которых могут возникать аэроупругие колебания, так малы, что экстремальное обледенение флагштока может привести к галопированию.

8. Определены диапазоны критических скоростей ветра вихревого возбуждения и соответствующие ветровые нагрузки для собственных частот и форм колебаний флагштоков. Приведенные квазистатические нагрузки для вихревого возбуждения дают

консервативную (завышенную) оценку для частот колебаний выше первой. Использование такого подхода в проектировании может привести к чрезмерному удорожанию конструкции флагштока, поэтому в качестве альтернативы статическим нагрузкам, **рекомендуется** проведение прямого динамического анализа конструкции на гармоническое воздействие.

9. **Рекомендуется** разработать проект и реализовать систему мониторинга конструкций флагштоков (или только одного из них), измеряющих отклонение и ускорение вершины флагштока, а также скорость и направление ветра. Данные мониторинга рекомендуется использовать, в том числе, для уточненной настройки динамических гасителей колебаний (в случае их установки) и своевременного принятия мер по усилению конструкций (при необходимости).