

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. № Акс-2022-09/1

«Утверждаю»
Генеральный директор АО НИЦ СтаДиО

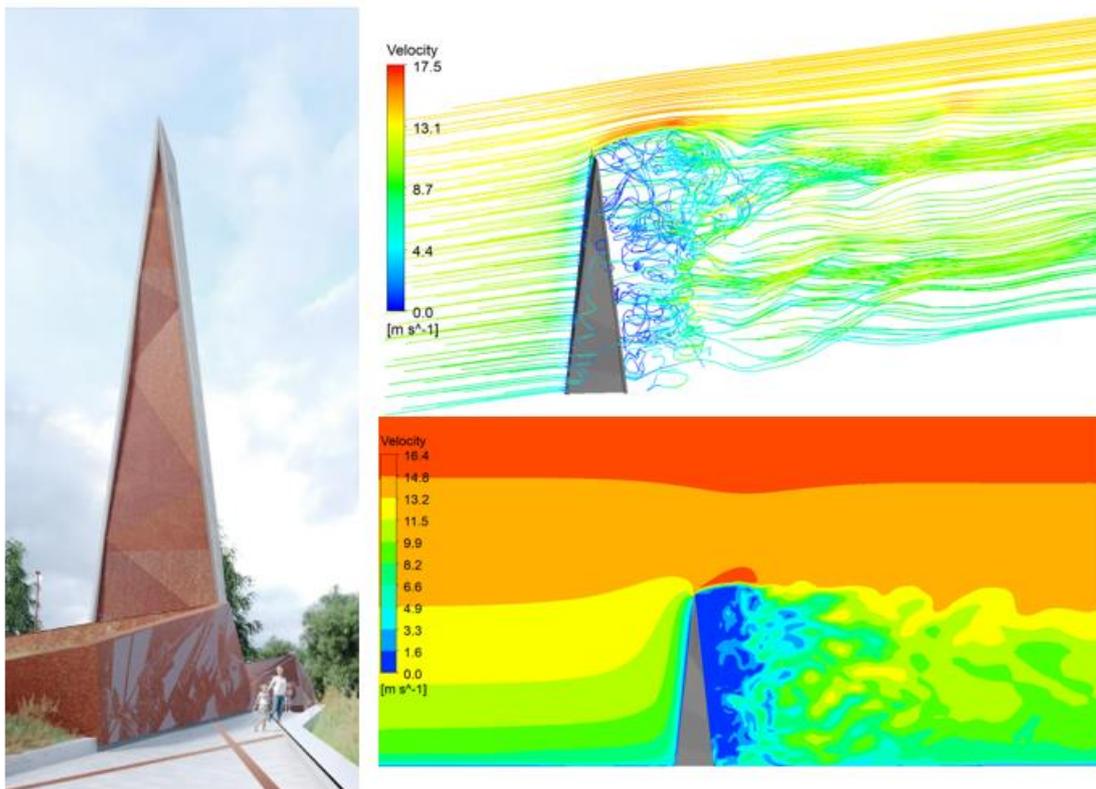
_____ А.М.Белостоцкий
“__” _____ 2022 г.

Научно-технический отчет

Научно-техническое сопровождение проектирования каркаса Стелы «Город трудовой доблести», г. Екатеринбург на основе математического (численного) моделирования трехмерных задач аэродинамики

Этап 1: Определение расчетных ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции стелы на основе математического (численного) моделирования трехмерных задач аэродинамики

Этап 2: Оценка корректности расчетного обоснования принятых технических решений по металлическому каркасу рамы



1. Исходные данные

Исследуемый Объект (Стела "город трудовой доблести") предполагается к возведению на пересечении ул. Николая Никонова и ул. Царская в г. Екатеринбурге (рис. 1.1). На рисунках приведены рендеры и фасады Стелы, которые позволяют получить общее представление о геометрии Объекта.

Согласно СП 20.13330.2016 площадка строительства находится в I ветровом районе, тип местности B.

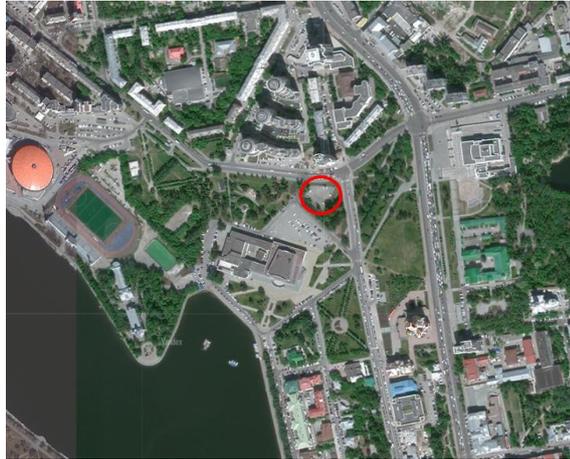


Рис. Карта местности возле площадки строительства



Рис. Рендеры Объекта

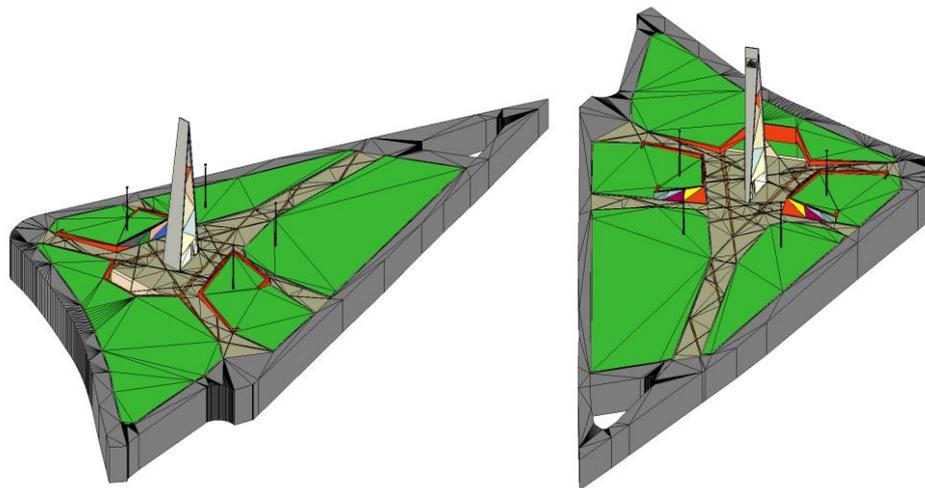


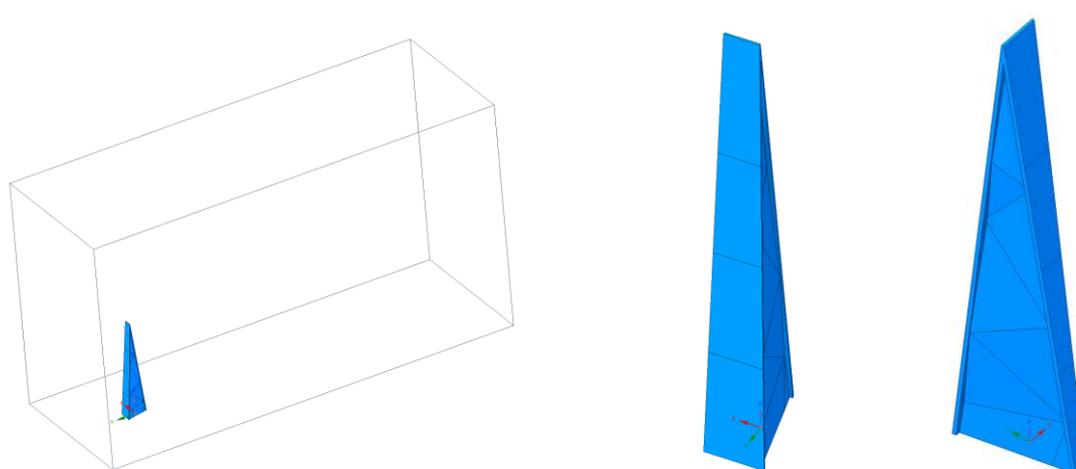
Рис. Геометрическая модель, переданная заказчиком

Этап 1 - Определение расчетных ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции стелы на основе математического (численного) моделирования трехмерных задач аэродинамики

2. Описание расчетных аэродинамических моделей

На первом этапе разработки расчетной аэродинамической модели, была создана геометрическая модель Стелы в программном модуле ANSYS SpaceClaim. С учетом предварительного статуса работы для получения скорейших результатов окружающая застройка, рельеф местности, малые архитектурные формы и некоторые детали Стелы (проем в основании) не учитывались.

Для выполнения условий корректной дискретизации пограничного слоя и лучших параметров функционирования численных алгоритмов ANSYS Fluent, моделирование выполнялось в уменьшенном геометрическом масштабе 1:100.



а) Общий вид на прямоугольный домен б) вид 1 на Стелу в) вид 2 на Стелу

Рис. Геометрическая модель

На основе созданной геометрической модели в программном модуле ANSYS Fluent Meshing была создана КО-объемная сетка модели. Метод разбиения сетки – Poly-Hexcore (комбинированная сетка с переходными полиэдрическими элементами и гексаэдрическими элементами в сердцевине).

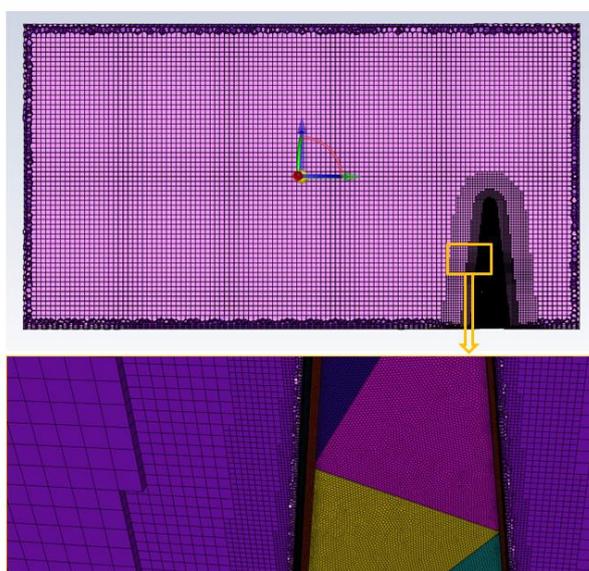


Рис. Разрез конечнообъемной сетки

В программном модуле ANSYS Fluent задаются настройки решения. Скорость ветра на входе и турбулентные характеристики соответствуют I ветровому району, типу местности B согласно СП 20.13330.2016. Проводились стационарные и нестационарные аэродинамические расчеты.

Для стационарного расчета использовался $RANS$ подход с моделью турбулентности $SST k-\omega$. Результаты стационарного расчета также использовались в качестве начальных условий для нестационарного расчета.

Для нестационарного расчета использовался подход DES . Моделируемое физическое время – $1c$ (соответствует $100c$ в реальном масштабе) с шагом по времени – $0.0001c$ (соответствует $0.01c$ в реальном масштабе).

3. Результаты аэродинамических расчетов

Имея ввиду ось симметрии объекта расчетные исследования проводились для трех характерных углов атаки (направлений ветра), показанных на рисунке.

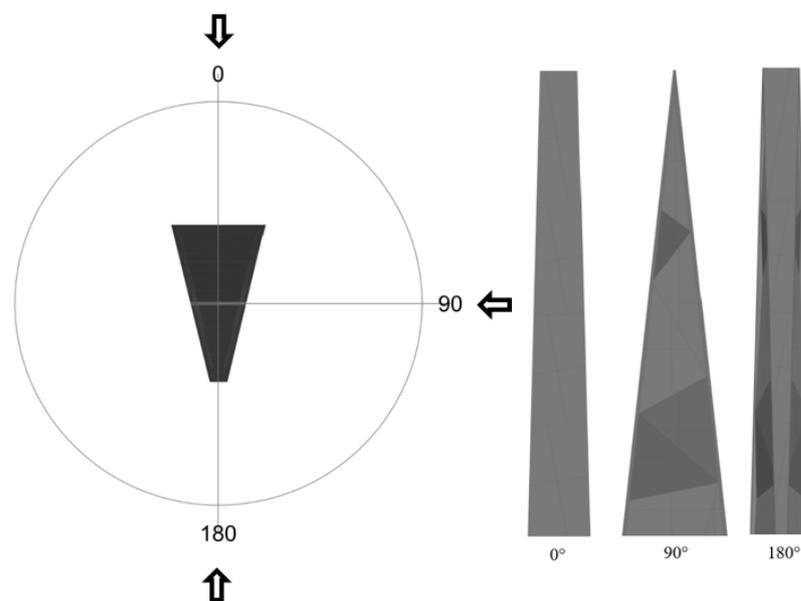


Рис. Расчетные углы атаки (направления ветра) и наветренная сторона Объекта для трёх расчетных случаев

В таблице приведены *расчетные* средние P_{ave} (для стационарного и нестационарного расчетов), максимальные P_{max} и минимальные P_{min} ветровые давления для компонент, на которые были разбиты поверхности Стелы. Также приведены среднеквадратичные отклонения σ_p соответствующих давлений.

В таблице ниже приведены соответствующие значения аэродинамических коэффициентов.

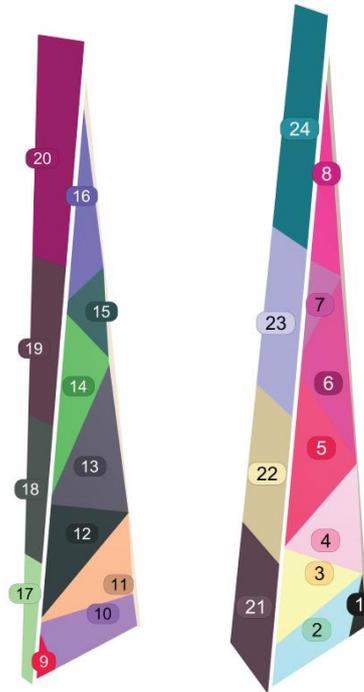


Рис. Нумерация компонент сбора аэродинамических нагрузок на поверхности Стелы (компоненты 17, 18, 19, 21, 22, 23 имеют высоту по 10м.)

Таблица Ветровые давления для компонент Стелы. Направление ветра 0°

№ комп.	P_{ave} , Па (стац. расчет)	P_{ave} , Па (нест. расчет)	P_{max} , Па	P_{min} , Па	σ_p , Па
1	-143	-143	70	-412	123
2	-537	-611	-524	-709	45
3	-446	-433	-350	-514	45
4	-333	-336	-266	-394	29
5	-252	-232	-193	-276	22
6	-202	-188	-153	-220	14
7	-168	-153	-129	-174	10
8	-156	-135	-108	-159	14
...

Таблица Аэродинамические коэффициенты для компонент Стелы. Направления ветра 0°

№ комп.	C_p (стац. расчет)	C_p (нест. расчет)	$C_{p,+}$	$C_{p,-}$	σ_p , Па
1	-0.33	-0.33	0.16	-0.94	0.28
2	-1.36	-1.55	-1.32	-1.79	0.11
3	-2.57	-2.49	-2.01	-2.95	0.26
4	-1.59	-1.60	-1.27	-1.88	0.14
5	-1.00	-0.92	-0.76	-1.09	0.09
6	-0.71	-0.66	-0.54	-0.77	0.05
7	-0.54	-0.50	-0.42	-0.56	0.03
8	-0.47	-0.40	-0.32	-0.48	0.04
...

Этап 2 - Оценка корректности расчетного обоснования принятых технических решений по металлическому каркасу рамы

4. Определение динамических и жесткостных характеристик Объекта

В разделе представлены результаты определения собственных форм и частот колебаний и эквивалентных жесткостных параметров Стелы, полученные на основе модального анализа конечно-элементных моделей (ЛИРА СОФТ), предоставленных заказчиком.

4.1. Исходные данные

Несущая система Объекта представляет собой стальной решетчатый каркас из прокатных трубчатых и двутавровых профилей. Основу несущей системы составляют 3 наклонные к геометрическому центру прокатные трубы 273x11 мм, образующих собой треугольную форму каркаса, которые соединяются между собой системами горизонтальных и вертикальных связей, за счет которой обеспечивается геометрическая неизменяемость системы. Общая высота конструкции – 42 м.

4.2. Разработанная расчетная КЭ-модель

Для проведения расчетного анализа собственных частот и форм колебаний и эквивалентных жесткостных параметров была использована стержневая конечно-элементная модель Стелы, предоставленная заказчиком.

4.3. Результаты расчетов

Модальный анализ проводился на основе собранных масс, для которых использовались статические загрузки: собственный вес (с коэффициентом сбора массы 0.95) и постоянная нагрузка (с коэффициентом 0.9).

В таблице приведены первые 8 собственных частот колебаний стелы, а на рисунке показаны соответствующие собственные формы колебаний стелы. В таблице далее приведены собственные вектора перемещений для зон по высоте стелы, под которым понимались высоты на уровне начала секций, начиная с уровня земли. Полученные вектора были получены в нормированном виде (максимальное перемещение (угол поворота) секции принимается равным 1.0). В качестве выбранных частот и форм колебаний выбирались формы, учитывающие общий характер колебательного процесса с наименьшей собственной частотой по соответствующим направлениям колебаний: (1-я форма относительно оси X, 4-я относительно оси Y и 5-я относительно вертикальной оси Z). Нормированные собственные вектора при необходимости могут быть использованы в расчетах конструкции на воздействие вихревого возбуждения.

Таблица. Собственные частоты колебаний стелы f_i , Гц

i	1	2	3	4	5	6	7	8
R1 (200м)	0.84	1.14**	1.92**	2.04	2.5	3.31	4.39	4.67

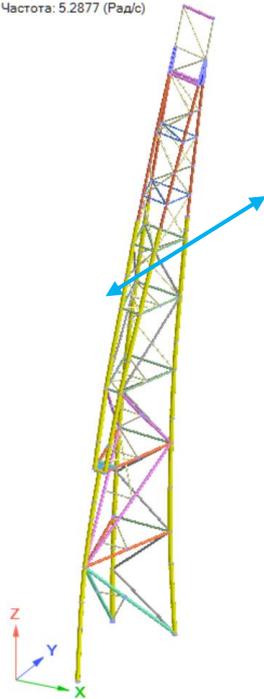
*зеленым цветом выделены изгибные формы колебаний, синим – крутильные

**локальные формы колебаний

Таблица. Нормированные собственные вектора перемещений (углов поворотов) $\varphi(z)$ для Стелы.

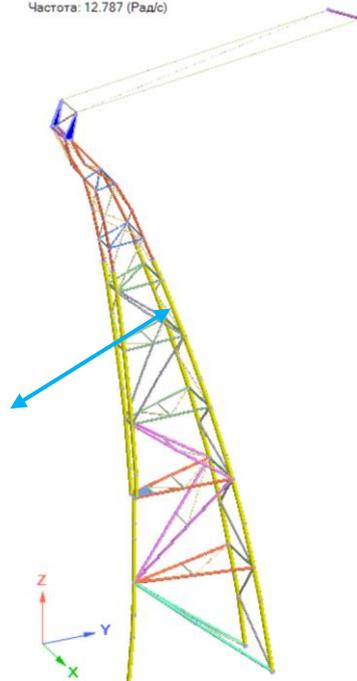
№ зоны по высоте	R1 и R3		
	$f_1 = 0.84 \text{ Гц}$	$f_4 = 2.04 \text{ Гц}$	$f_5 = 2.50 \text{ Гц}$
	$\varphi_x(z)$	$\varphi_y(z)$	$\varphi_{rot}(z)$
1	1.00	0.93	0.72
2	0.93	1.00	1.00
3	0.80	0.72	0.79
4	0.65	0.56	0.56
5	0.55	0.46	0.44
6	0.42	0.35	0.40
7	0.27	0.22	0.33
8	0.19	0.15	0.28
9	0.15	0.12	0.25
10	0.05	0.04	0.13
11	0.00	0.00	0.00

19.1. Форма 1
Массы собраны из: 1; 2
Частота: 5.2877 (Рад/с)



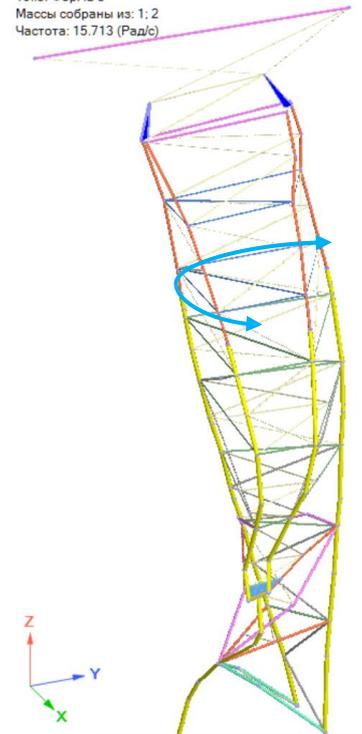
а) 1-я форма колебаний
 $f_1 = 0.84 \text{ Гц}$

19.4. Форма 4
Массы собраны из: 1; 2
Частота: 12.787 (Рад/с)



б) 4-я формы колебаний
 $f_4 = 2.04 \text{ Гц}$

19.5. Форма 5
Массы собраны из: 1; 2
Частота: 15.713 (Рад/с)



в) 5-я формы колебаний
 $f_5 = 2.50 \text{ Гц}$

Рис. Собственные формы колебаний стелы

Далее в соответствующем разделе отчета о настоящем исследовании определяются эффективные массы стелы, а также параметр эквивалентной крутильной жесткости, используемый для определения критических скоростей дивергенции.

5. Разработка и верификация расчетных аэродинамических моделей

5.1. Геометрические модели Объекта

Практическая подготовка расчетных моделей начинается с создания геометрических объемных моделей Объекта. Геометрия Объекта выполнена согласно исходным данным и аналогична представленной в разделе 2.

5.2. Конечнообъемные сетки

Конечнообъемные сетки для последующих расчетов формируются следующим образом: после создания в модуле ANSYS SpaceClaim геометрическая модель Объекта «вычитается» из объема воздушного пространства в форме параллелепипеда. Далее в модуле ANSYS Fluent Meshing в полученном объеме создается эффективная в вычислительном смысле конечнообъемная сетка из гексагональных (с висячими узлами) и полиэдрических элементов и назначаются поверхности сбора аэродинамических нагрузок (для удобства дальнейшего присвоения граничных условий в препроцессоре ANSYS Fluent и обработки результатов расчетов в постпроцессоре ANSYS CFD-POST).

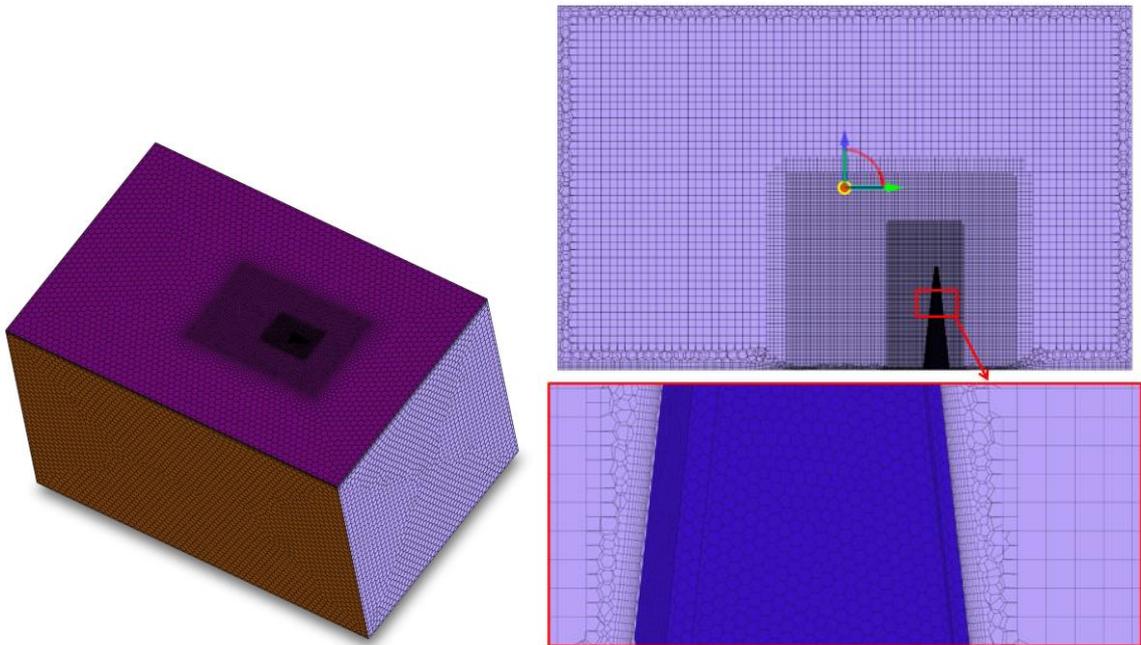


Рис. Конечнообъемная сетка расчетной области: вид снизу (слева); вид в разрезе (справа)

5.3 Граничные и начальные условия

Скорость ветра и турбулентные характеристики на «*входе потока*» (*INLET*) соответствуют *I* ветровому району, типу местности *B* согласно СП 20.13330.2016.

На «*выходе потока*» (*OUTLET*) назначаются «*мягкие*» граничные условия Opening с нулевыми дополнительными давлениями и такими же параметрами турбулентности, как и на «*входе*». На поверхности Стеллы и на «*земле*» задавалось условие «*стенки с прилипанием*» (*No-Slip Wall, U=V=W=0 м/с*). На остальных гранях было задано условие симметрии (*Symmetry*).

Для нестационарных расчетов в качестве начальных условий использовались соответствующие результаты стационарных расчетов.

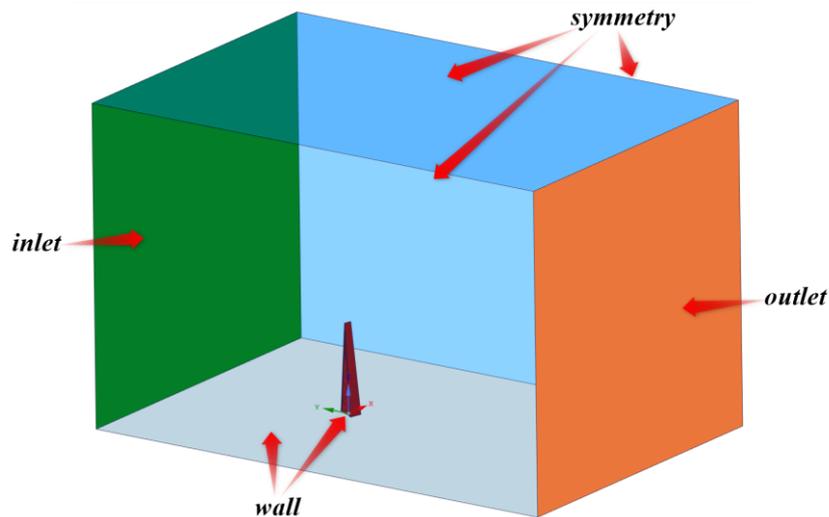


Рис. Расчетная область с обозначенными граничными условиями.

5.4 Параметры расчетов

Расчеты проводились в *стационарной и нестационарной постановках*.

Для стационарного расчета использовался *RANS* подход с моделью турбулентности *SST k- ω* . Результаты стационарного расчета также использовались в качестве начальных условий для нестационарного расчета. Критерием окончания счета назначалось максимальное количество итераций – 150 или достижение максимальных невязок по давлению и по всем компонентам скорости 10^{-4} .

Для нестационарных расчетов использовался гибридный подход *SBES* (в пограничной слое у стенок используется *RANS* модель *SST k- ω* , а в остальной расчетной области *LES WALE*). Моделируемое физическое время – $1-1.5c$ (соответствует $100-150c$ в реальном масштабе) с шагом по времени – $5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}c$ (соответствует $0.005-0.01c$ в реальном масштабе).

6. Оценка аэроупругой неустойчивости

С учетом описаний аэроупругих явлений, можно сделать вывод о том, что для исследуемой Стелы следует провести оценки возможности возникновения таких видов неустойчивости как галопирование, дивергенция и вихревое возбуждение.

В существующих нормах (отечественных и зарубежных) содержатся инженерные подходы для оценки критических скоростей возникновения галопирования, дивергенции и вихревого возбуждения, используемые в этой главе.

6.1. Оценка возможности галопирования по нормативной методике

В отечественных и зарубежных нормах приводится рекомендация для оценки возможности возникновения эффекта галопирования.

В отечественных нормах СП указано, что аэродинамически неустойчивые колебания типа галопирования могут возникнуть в протяженных сплошностенчатых сооружениях при выполнении трех условий:

- 1) относительное удлинение $\lambda_e > 20$, где λ_e определяется в соответствии с указаниями СП 20.13330 ($\lambda_e = l/b$, l , b – соответственно максимальный и минимальный размеры сооружения или его элемента в плоскости, перпендикулярной направлению ветра;
- 2) коэффициент a_g удовлетворяет критерию Ден-Гартога

3) максимально возможная скорость ветра для места строительства на высоте рассматриваемого сечения превышает критическую скорость $V_{cr,g}$.

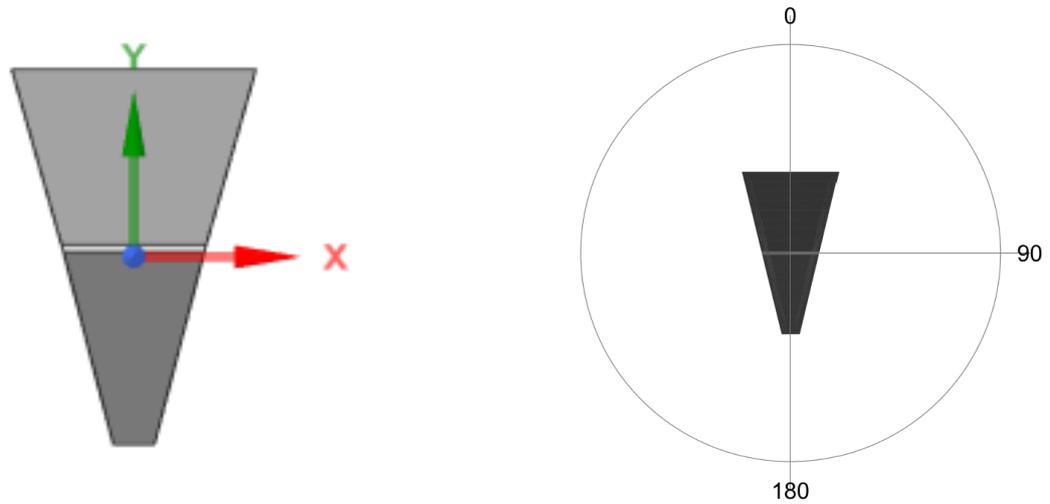


Рис. Схема для пояснения критерия Ден-Гартога (V – вектор набегающего потока)

По результатам многовариантных расчетов при различных направлениях ветра были получены значения аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления и подъемной (боковой) силы на стеллу. Далее по формуле был определен критерий Ден-Гартога a_g

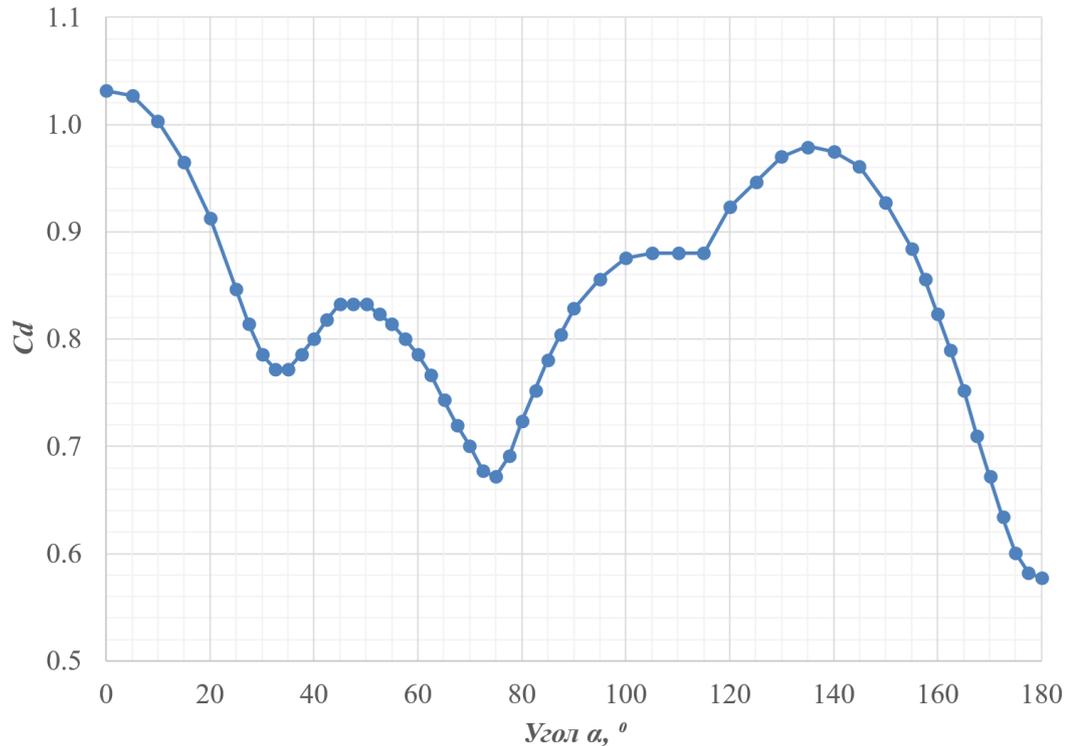


Рис. График зависимости коэффициента силы лобового сопротивления C_D от угла атаки ветра α .

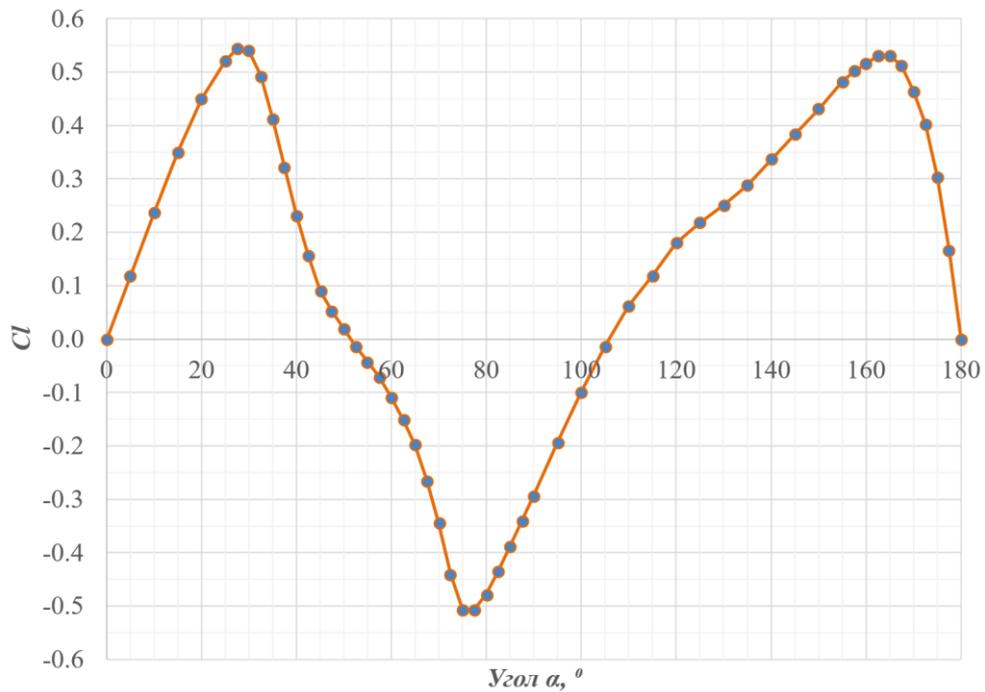


Рис. График зависимости коэффициента подъемной силы C_L от угла атаки ветра α .

Таблица. Численное моделирование: средние значения аэродинамических коэффициентов C_D , C_L критерий Ден-Гартога a_g .

Угол α , °	C_D	C_L	$\frac{dC_L}{d\alpha}$	a_g	Угол α , °	C_D	C_L	$\frac{dC_L}{d\alpha}$	a_g
0	1.032	0.000	1.356	2.387	82.5	0.752	-0.435	1.030	1.783
5	1.027	0.118	1.356	2.383	85	0.781	-0.388	1.085	1.865
10	1.003	0.237	1.329	2.332	87.5	0.805	-0.341	1.085	1.889
15	0.965	0.350	1.220	2.186	90	0.828	-0.293	1.103	1.931
20	0.913	0.450	0.976	1.889	95	0.857	-0.194	1.112	1.968
25	0.847	0.521	0.633	1.480	100	0.875	-0.099	1.030	1.906
27.5	0.814	0.544	0.217	1.031	105	0.880	-0.014	0.922	1.802
30	0.786	0.539	-0.597	0.189	110	0.880	0.062	0.759	1.639
32.5	0.771	0.492	-1.464	-0.693	115	0.880	0.118	0.678	1.558
35	0.771	0.412	-1.952	-1.181	120	0.923	0.180	0.569	1.492
37.5	0.786	0.322	-2.061	-1.275	125	0.946	0.218	0.407	1.353
40	0.800	0.232	-1.898	-1.098	130	0.970	0.251	0.407	1.377
42.5	0.819	0.156	-1.627	-0.808	135	0.980	0.289	0.488	1.468
45	0.833	0.090	-1.193	-0.360	140	0.975	0.336	0.542	1.517
47.5	0.833	0.052	-0.813	0.019	145	0.961	0.383	0.542	1.503
50	0.833	0.019	-0.759	0.074	150	0.928	0.431	0.569	1.497
52.5	0.823	-0.014	-0.705	0.118	155	0.885	0.483	0.488	1.373
...					

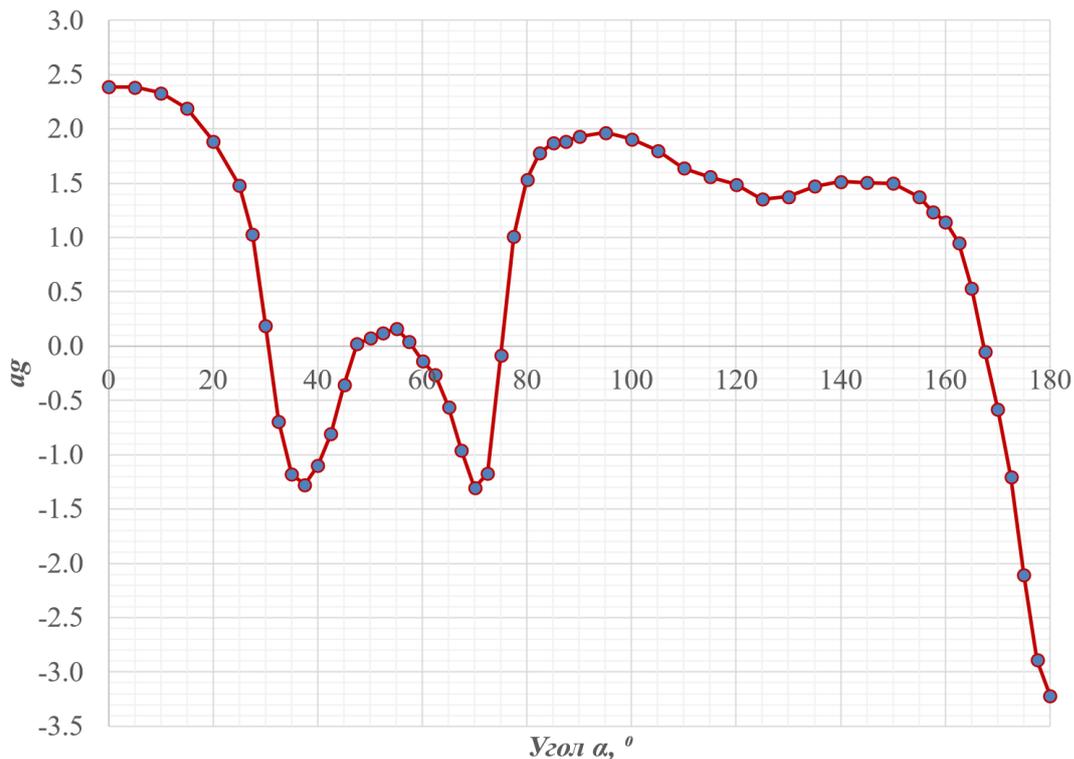


Рис. График зависимости коэффициента a_g от угла атаки ветра α .

В таблице представлены полученные по формуле значения критических скоростей возникновения галопирования ($f_l=0.84$ Гц). Т.к. скорость ветра непостоянна по высоте стелы, то в качестве критической скорости $V_{cr,g}$ принимается скорость на высоте 10м над землей, полностью определяющая профиль ветра во всех других точках по высоте.

Таблица 6.1. Значения критических скоростей возникновения галопирования.

Угол α , °	a_g	$V_{cr,g}$, м/с
32.5	-0.693	21.57
35	-1.181	12.65
37.5	-1.275	11.72
40	-1.098	13.61
42.5	-0.808	18.49
45	-0.360	41.49
60	-0.136	109.61
62.5	-0.264	56.66
65	-0.559	26.75
67.5	-0.962	15.54
70	-1.306	11.44
72.5	-1.167	12.80
75	-0.087	171.33
167.5	-0.049	302.77
170	-0.575	25.97
172.5	-1.210	12.35
175	-2.110	7.08
177.5	-2.889	5.17
180	-3.219	4.64

6.2. Оценка возможности дивергенции по нормативной методике

В отечественных (СП 20 и зарубежных (Eurocode, CNR-DT 207 R1/2018) нормах приводится рекомендация для оценки возникновения эффекта дивергенции.

В Eurocode даны три условия, при выполнении которых конструкция считается подверженной возникновению дивергенции или флаттера. Причем эти условия должны проверять в определенной последовательности и при несоблюдении одного из них конструкция или ее элемент считается не восприимчивой к данным явлениям.

По результатам численного моделирования был получен коэффициент аэродинамического момента, действующего на стеллу. В таблице далее представлены полученные по формуле значения критических скоростей возникновения дивергенции ($G \cdot J_t = 1\,697.1 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$).

Таблица. Численное моделирование: средние значения коэффициента аэродинамического момента C_{Mz} и производная $C_{Mz}/d\alpha$.

Угол α , °	C_{Mz}	$\frac{dC_{Mz}}{d\alpha}$	Угол α , °	C_{Mz}	$\frac{dC_{Mz}}{d\alpha}$
0	0.000	-0.090	82.5	0.081	-0.110
5	-0.008	-0.092	85	0.077	-0.104
10	-0.016	-0.100	87.5	0.072	-0.095
15	-0.025	-0.122	90	0.068	-0.090
20	-0.038	-0.155	95	0.061	-0.085
25	-0.052	-0.123	100	0.054	-0.078
27.5	-0.057	-0.049	105	0.047	-0.069
30	-0.057	0.057	110	0.041	-0.056
32.5	-0.052	0.165	115	0.037	-0.025
35	-0.042	0.249	120	0.037	-0.020
37.5	-0.030	0.311	125	0.034	-0.041
40	-0.015	0.343	130	0.030	-0.045
42.5	0.000	0.332	135	0.026	-0.044
45	0.014	0.278	140	0.022	-0.038
...			

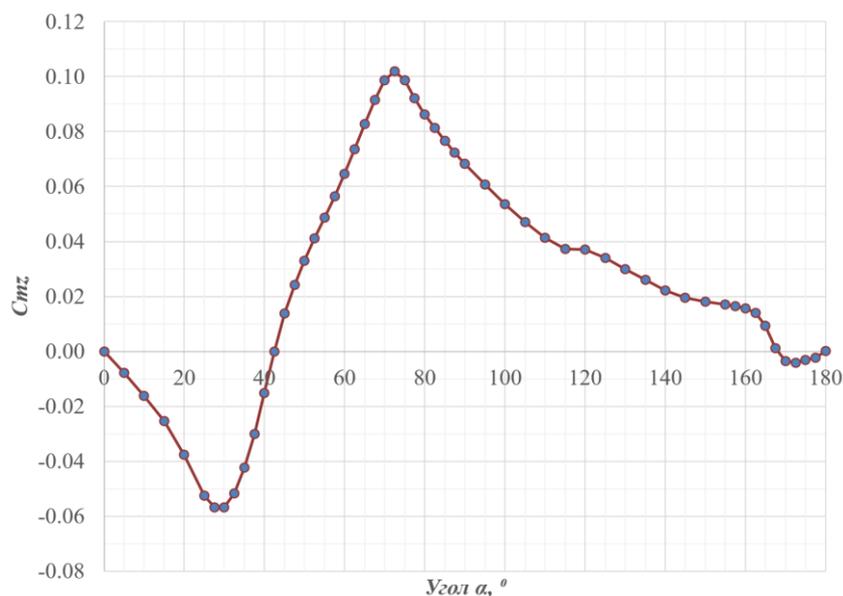


Рис. График зависимости коэффициента аэродинамического момента C_{Mz} от угла атаки ветра α .

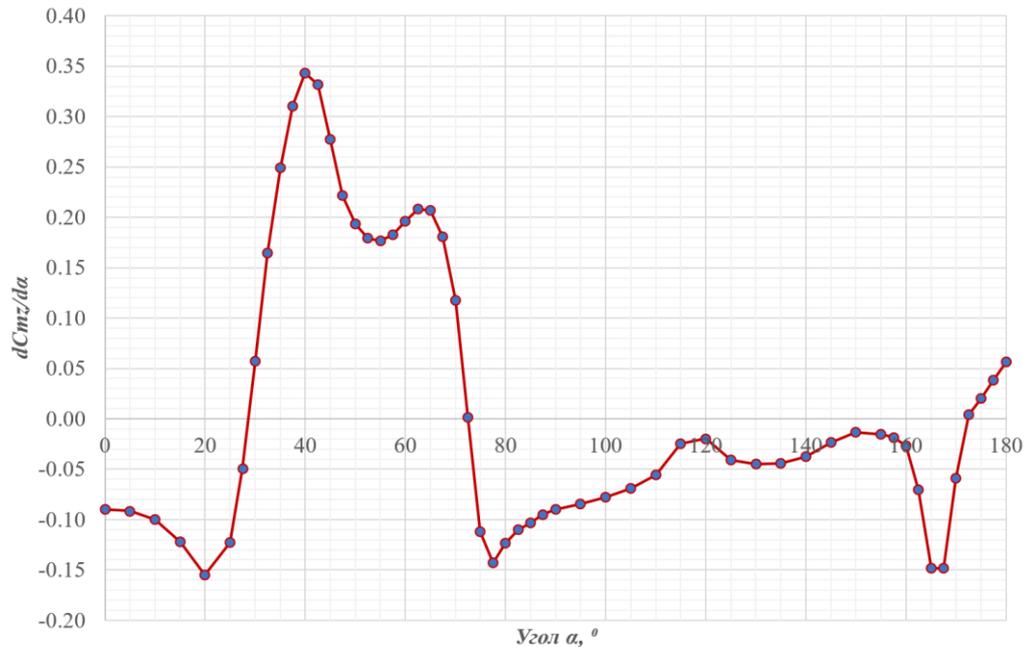


Рис. График зависимости производной коэффициента аэродинамического момента $dC_{Mz}/d\alpha$ от угла атаки ветра α .

Таблица Значения критических скоростей возникновения дивергенции.

Угол $\alpha, ^\circ$	$\frac{dC_{Mz}}{d\alpha}$	$V_{cr,d}, \text{ м/с}$
0	-0.090	21373
5	-0.092	21142
10	-0.100	20217
15	-0.122	18301
20	-0.155	16242
25	-0.123	18260
27.5	-0.049	28781
75	-0.112	21373
77.5	-0.143	19117
80	-0.123	16921
82.5	-0.110	18227
...

6.3. Оценка возможности вихревого возбуждения по нормативной методике

Согласно СП, резонансное вихревое возбуждение не возникает в случае, если

$$V_{cr,i} > V_{max}(z_{ЭК})$$

где V_{max} – максимальная скорость ветра ($V_{max} = 18.5 \text{ м/с}$, см. (6.5)); $V_{cr,i}$ – критические скорости ветра, при которых происходит резонансное вихревое возбуждение по i -ой собственной форме колебаний

На основе проведенных расчетов были определены амплитудные спектры аэродинамического коэффициента подъемной силы. На графиках показаны спектры, определенные с помощью быстрого дискретного преобразования Фурье. Анализ амплитудных спектров

позволил выявить основные энергонесущие частоты аэродинамической силы (коэффициента) и соответствующие им амплитуды.

В табличном виде приведены характерные числа Струхаля и соответствующие амплитуды аэродинамического коэффициента подъемной силы и диапазоны критических скоростей (скорости, при которых происходит захват собственной частоты колебаний конструкции), определенных по формуле. Диапазоны критических скоростей были определены для первой изгибной собственной форме ($f_1=0.84$ Гц).

Таблица Характерные числа Струхаля (St) и соответствующие амплитуда аэродинамического коэффициента подъемной силы ($C_{L,ampl}$) и критических скоростей ($V_{cr,1}$).

Угол атаки, °	St	$C_{L,ampl}$	$V_{cr,1}$, м/с
0	0.134	0.269	46.34 - 56.64
90	0.125	0.022	49.61 - 60.63
180	0.258	0.0024	24.05 - 29.40
	0.094	0.0021	66.15 - 80.85

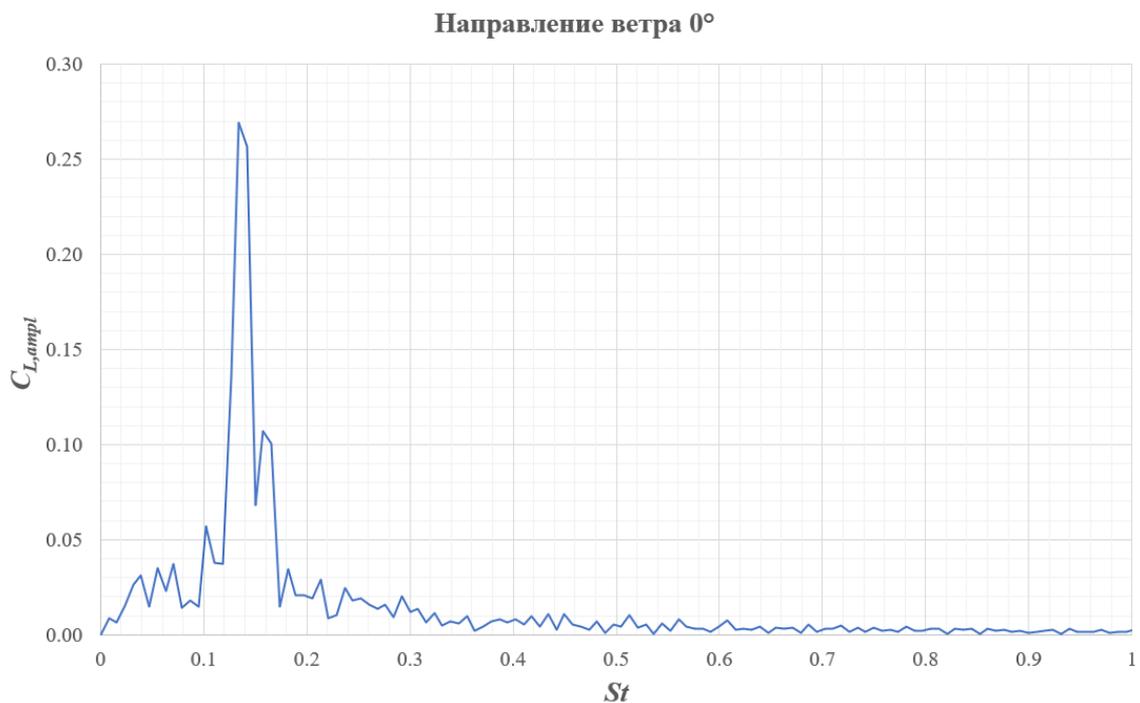


Рис. Амплитудно-частотный спектр. Угол атаки 0°

7. Математическое (численное) моделирование аэроупругого взаимодействия Объекта с воздушным потоком

Для опровержения (галопирования) и подтверждения (дивергенция/флаттер) полученных оценок о возможности возникновения аэроупругой неустойчивости по нормативной методике было проведено прямое численное моделирование двухстороннего взаимодействия Стелы и воздушного потока в ПК ANSYS (двухсторонний FSI, реализуемый связкой модулей Fluent и Mechanical). Расчет проводился при ураганной скорости ветра для площадки строительства.

7.1. Параметры расчетной модели

Согласно проведенной инженерной оценке опасными направлениями с точки зрения возникновения явления галопирования являются углы атаки ветра 35° - 42.5° , 67.5° - 72.5° , 172.5° - 180° . Для каждого интервала было выбрано направление, для которого, согласно оценке, критическая скорость возникновения галопирования меньше. Таким образом, рассматривалось три случая: углы атаки 37.5° , 70° и 180° .

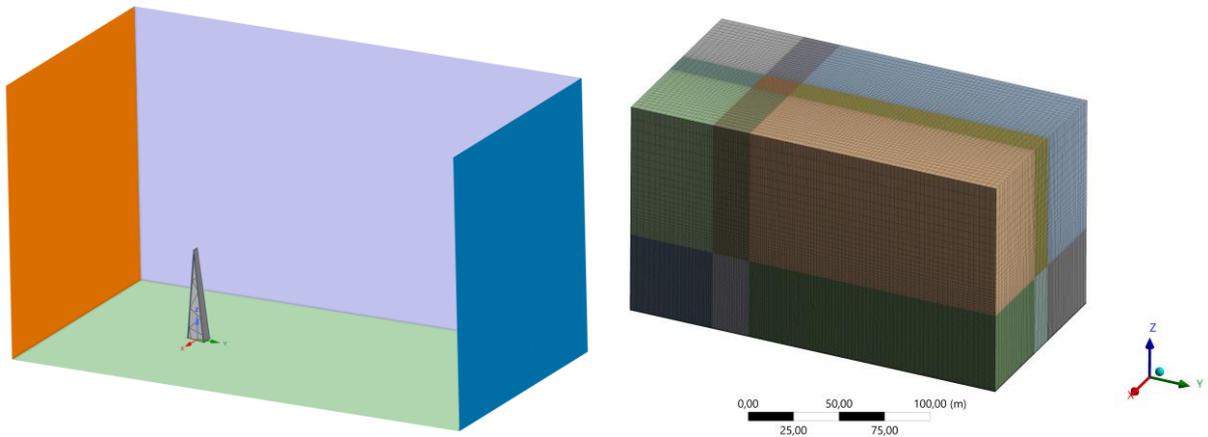


Рис. Геометрическая модель воздушного домена (слева) и КО-модель (справа). Общий вид

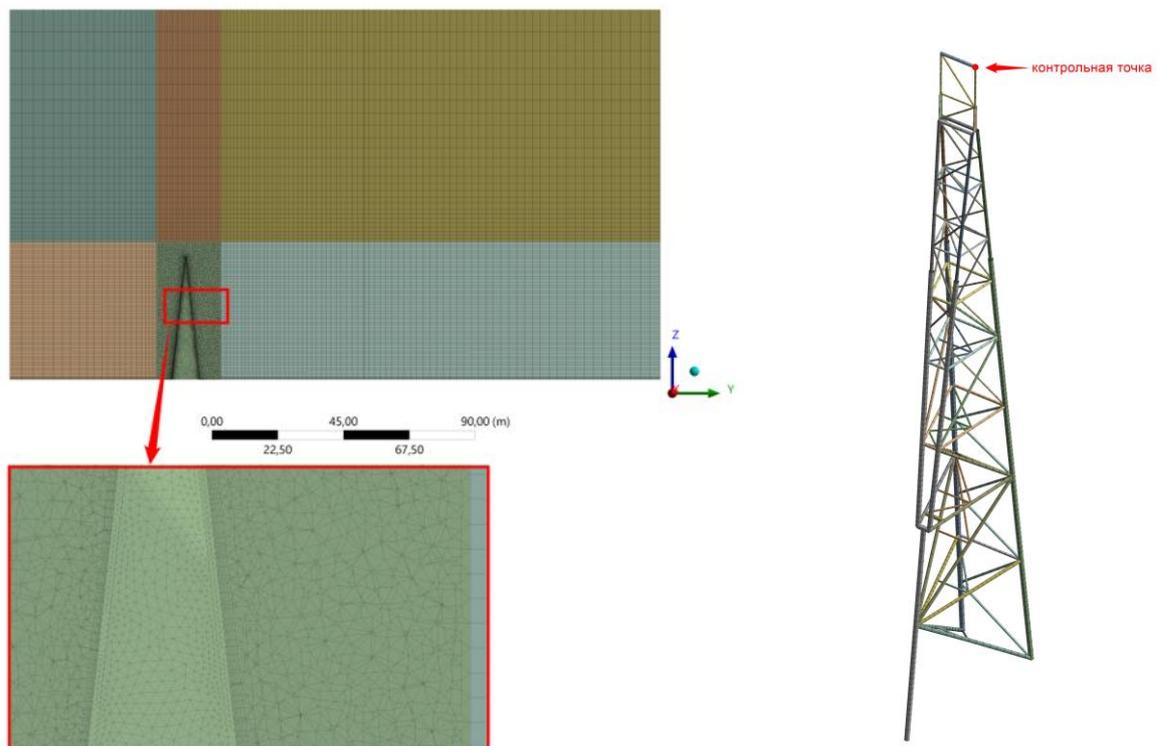


Рис. КО-модель, вид в разрезе (слева); расположение контрольной точки (справа)

Области аэродинамического расчета присвоен домен Air (Воздух) со следующими физическими параметрами: тип среды – несжимаемый воздух при температуре (25°C) и давление 1 атм.

Граничные условия на "входе" (*INLET*) соответствуют 1-му ветровому району, типу местности *B*. В качестве граничного условия на "выходе" (*Outlet*) было задано относительное давление, равное 0. На поверхности земли задавалось условие "стенки с прилипанием". (No-Slip Wall, $U=V=W=0$ м/с), исключающее проникновение вещества через поверхность. На поверхности Стелы применялось условие интерфейса «жидкость-структура». На остальных гранях было задано условие симметрии (*Symmetry*).

При моделировании применялась гибридная RANS-LES модель турбулентности SBES (Stress-Blended Eddy Simulation), которая зарекомендовала себя в расчетах нестационарных потоков.

7.1. Параметры расчета в связанной постановке

Размер временного шага составляет $\Delta t = 0.025-0.05$ с. Физическое время расчета 65-100 с.

Для обеспечения сходимости и устойчивости решения на каждом связанном шаге по времени необходимо задавать следующие параметры расчета:

- максимальное количество итераций на каждом связанном шаге;
- критерий сходимости для нагрузок и перемещений;
- коэффициент нижней релаксации для вычисления нагрузок и перемещений на каждой итерации связанного шага.

В данном исследовании для нагрузок был задан постоянный коэффициент нижней релаксации $\alpha = 0.75$, для перемещений - $\alpha = 0.75$. Для достижения критерия сходимости было назначено 3 подытерации FSI (максимальное количество итераций на каждом связанном шаге) и критерий сходимости для нагрузок и перемещений задан равным 10^{-3} .

Интегрирование для уравнений движения механической системы – неявный метод Ньюмарка.

7.2. Результаты решения связанной задачи

В соответствующем разделе представлены полученные результаты:

- графики зависимости перемещений контрольной точки вдоль осей x и y от времени;
- графики зависимостей аэродинамических сил от времени, действующих на Стелу;
- изополя суммарных перемещений Стелы в разные моменты времени;
- изополя перемещений вдоль оси x Стелы в разные моменты времени;
- изополя перемещений вдоль оси y Стелы в разные моменты времени;
- изополя скоростей в вертикальной плоскости в разные моменты времени.

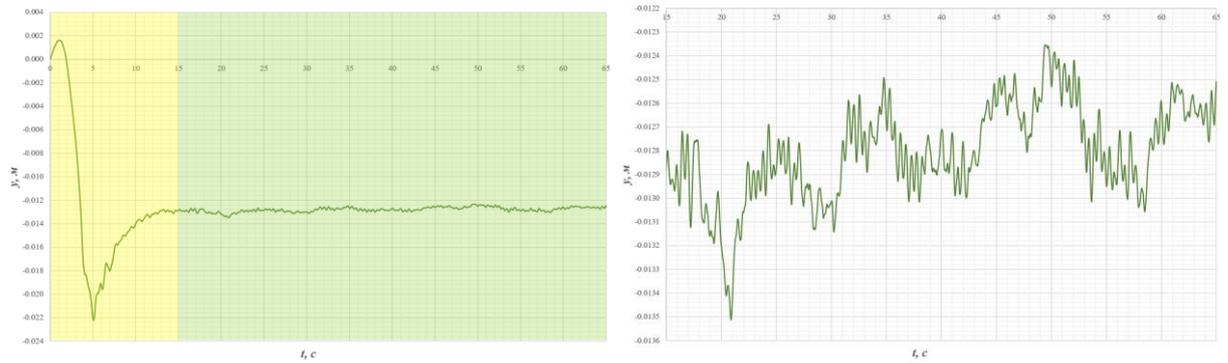


Рис. График зависимости перемещений контрольных точек вдоль оси y от времени, м. Угол атаки 37.5°

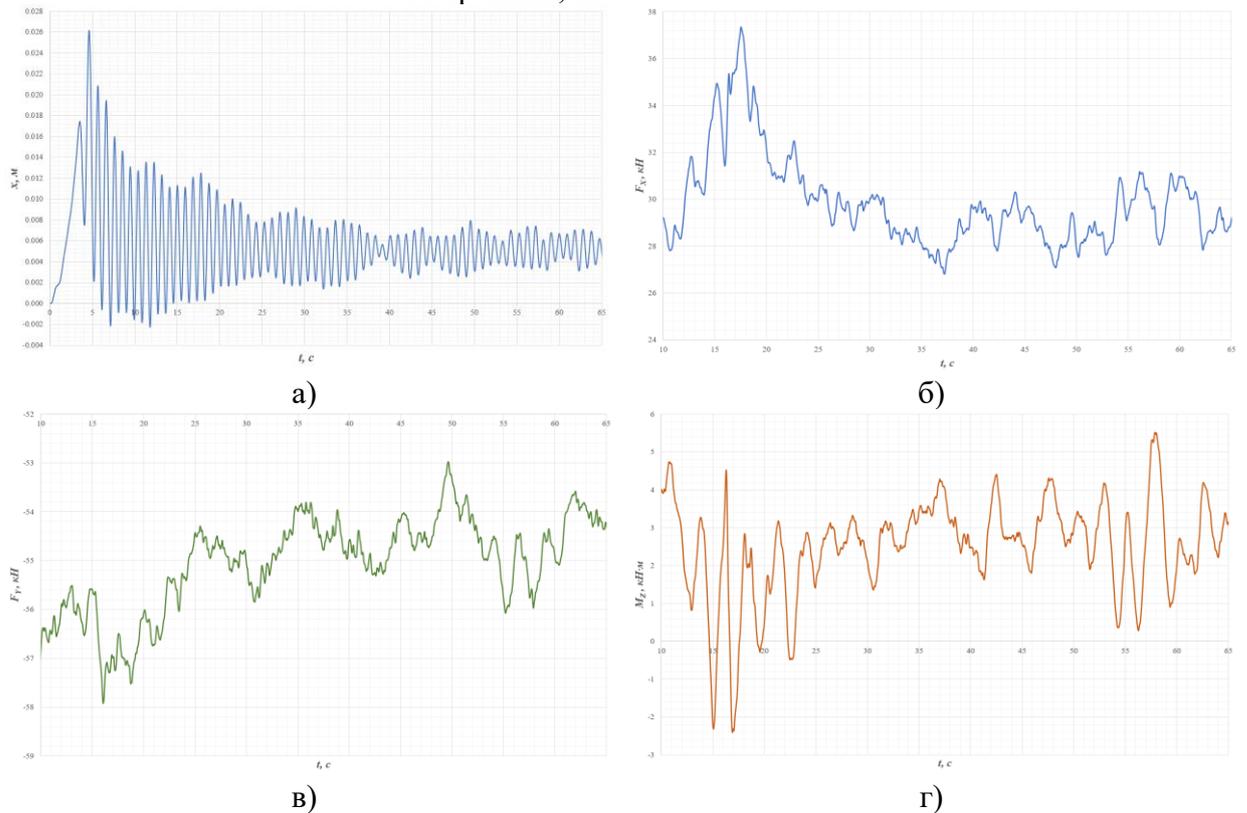
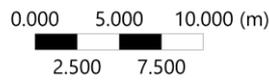
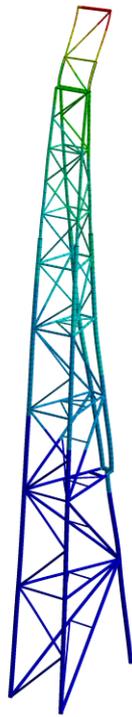
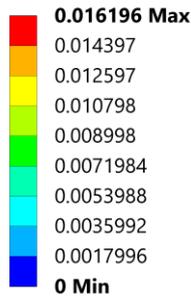


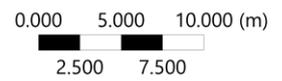
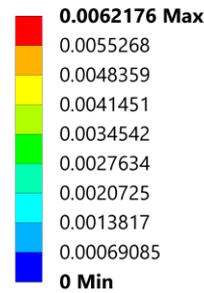
Рис. График зависимости: а) перемещений контрольных точек вдоль оси x от времени, м; б) силы F_x от времени, действующей на Стелу, кН; в) силы F_y от времени, действующей на Стелу, кН; г) График зависимости крутящего момента M_x от времени, действующей на Стелу, кН·м.

A: Transient Structural
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: m
 Time: 40. s
 13.02.2023 15:52



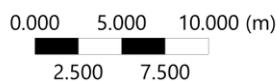
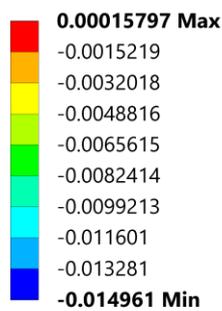
а)

A: Transient Structural
 Directional Deformation
 Type: Directional Deformation(X Axis)
 Unit: m
 Global Coordinate System
 Time: 40. s
 13.02.2023 15:54



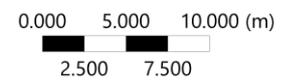
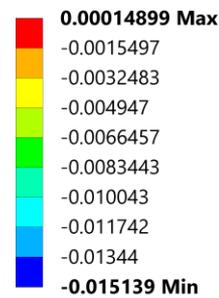
б)

A: Transient Structural
 Directional Deformation 2
 Type: Directional Deformation(Y Axis)
 Unit: m
 Global Coordinate System
 Time: 40. s
 13.02.2023 15:57



в)

A: Transient Structural
 Directional Deformation 2
 Type: Directional Deformation(Y Axis)
 Unit: m
 Global Coordinate System
 Time: 55. s
 13.02.2023 15:56



г)

Рис. Перемещения: а) суммарное перемещение в разные моменты времени, м; б) вдоль оси x в разные моменты времени, м; в) вдоль оси y (40 секунд), м; г) вдоль оси y (55 секунд), м

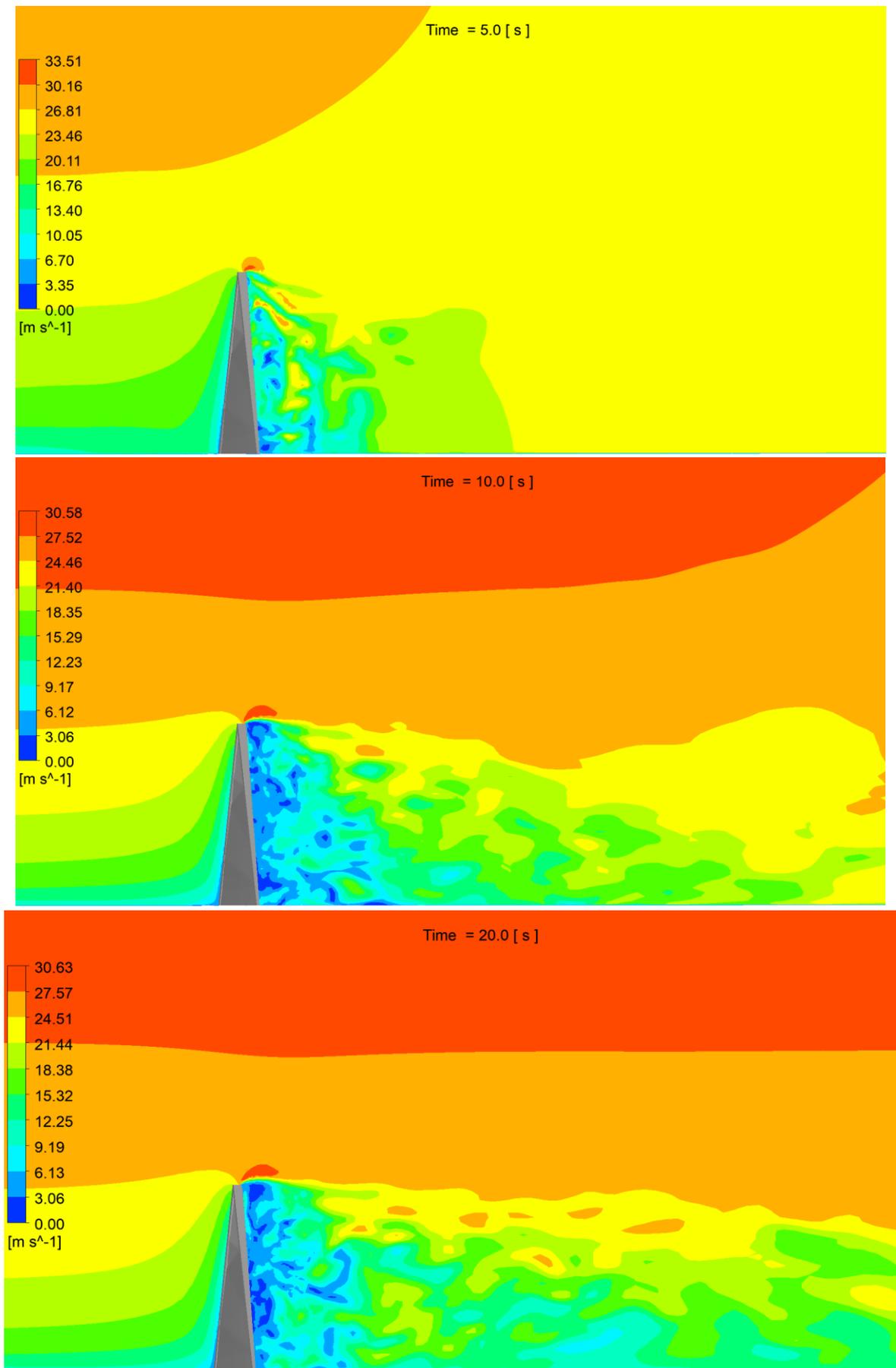


Рис. Изополя скоростей, м/с в вертикальной плоскости в разные моменты времени

Выводы и рекомендации

По результатам НИР, выполненной по договору по договору № 2.711-1/2022-Акс-32 от 20.09.2022 «Научно-техническое сопровождение проектирования каркаса Стелы «Город трудовой доблести», г. Екатеринбург на основе математического (численного) моделирования трехмерных задач аэродинамики» (Этап 1 «Определение расчетных ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции стелы на основе математического (численного) моделирования трехмерных задач аэродинамики») можно сделать следующие выводы и рекомендации:

Этап 1:

1. На основе анализа и обобщения исходных данных разработана и верифицирована математическая (численная) аэродинамическая модель Стелы.

2. С использованием современных численных методов гидрогазодинамики, реализованных в программном комплексе ANSYS CFD (Fluent) в комбинации с авторскими методиками, реализующими решение узкоспециализированных задач строительной аэродинамики, проведены многовариантные расчетные аэродинамические исследования Объекта при 3-х характерных направлениях ветра (0° , 90° и 180°).

3. При обосновании механической безопасности несущих конструкций Стелы **рекомендуется** использовать расчетные средние ветровые нагрузки P_{ave} или соответствующих аэродинамических коэффициентов C_p , определенные по результатам нестационарных аэродинамических расчетов. Пульсационную составляющую ветровой нагрузки следует принимать согласно СП 20.13330.2016.

4. При обосновании механической безопасности фасадных конструкций Стелы **рекомендуется** использование расчетных максимальных P_{max} и минимальных P_{min} ветровых давлений или соответствующих аэродинамических коэффициентов $C_p, +(-)$. При этом значение коэффициента пульсаций $\zeta(z_e)$ следует принимать согласно СП 20.13330.2016, а коэффициенты корреляции $v_{+(-)}$ следует принять равными 1.0, т.к. корреляция уже напрямую учтена в результатах расчетов для соответствующих компонент.

Этап 2:

1. На основе предоставленных КЭ-моделей определены динамические и жесткостные характеристики Стелы.

2. На основе анализа и обобщения исходных данных разработана и верифицирована математическая (численная) аэродинамическая модель Стелы.

3. С использованием современных численных методов гидрогазодинамики, реализованных в программном комплексе ANSYS CFD (Fluent) в комбинации с авторскими методиками, реализующими решение узкоспециализированных задач строительной аэродинамики, проведены многовариантные расчетные аэродинамические исследования Объекта в *стационарной* постановке для 37-ми направлений ветра (от 0° до 180° с шагом 5°) и дополнительно для 18-ти направлений ветра (27.5° , 32.5° , 37.5° , 42.5° , 47.5° , 52.5° , 57.5° , 62.5° , 67.5° , 72.5° , 77.5° , 82.5° , 87.5° , 157.5° , 162.5° , 167.5° , 172.5° , 177.5°), а также в *нестационарной* постановке при 3-х характерных направлениях ветра (0° , 90° и 180°).

4. Проведенная оценка по нормативной методике показывает, что для исследуемого Объекта *возможно* возникновение явления **галопирования** при скоростях ветра, наблюдаемых на площадке строительства. Также проведенная оценка по

нормативной методике показывает, что для исследуемого сечения *невозможно* возникновение явлений *дивергенции* и *вихревого возбуждения* при скоростях ветра, наблюдаемых на площадке строительства.

5. В результате прямого численного моделирования связанной задачи двухстороннего взаимодействия Стелы и воздушного потока в ПК ANSYS (двухсторонний FSI, реализуемый связкой модулей Fluent и Mechanical) при ураганном ветре для трех направлений ветра (37.5° , 70° , 180°) выявлено:

– максимальная амплитуда перемещений вдоль оси x контрольной точки не превышает: 6.2 мм для *направления* 37.5° , 6.9 мм для *направления* 70° , 7.9 мм для *направления* 180° ;

– максимальная амплитуда перемещений вдоль оси y контрольной точки не превышает: 0.6 мм для *направления* 37.5° , 0.4 мм для *направления* 70° , 0.6 мм для *направления* 180° .

– в течение моделируемого времени не было обнаружено увеличения амплитуд колебаний.

Таким образом, поверочный двухсторонний связанный расчет аэроупругих колебаний Стелы подтвердил *отсутствие* явлений аэроупругой неустойчивости при максимально возможной скорости ветра для места строительства.

6. Нормативные (инженерные) методики оценки аэродинамической неустойчивости имеют низкую точность, т.к. основаны на серьезных допущениях в угоду получения простой аналитической формулы. В результате их применения возможно получение как чрезмерно консервативных оценок (аэродинамическая неустойчивость при незначительных скоростях ветра), так и явно заниженных нефизичных оценок (аэродинамическая неустойчивость при скоростях ветра в тысячи и десятки тысяч метров в секунду). Напротив, прямое численное моделирование связанных аэроупругих колебаний конструкций позволяет при минимальных допущениях получить адекватные оценки возможности возникновения аэроупругой неустойчивости.

Оценку о невозможности возникновения аэроупругих явлений, полученную по результатам прямого численного моделирования, *следует признать приоритетной* перед предварительными нормативными (инженерными) оценками. Таким образом, для исследуемой Стелы *невозможно* возникновение явлений аэроупругой неустойчивости при максимально возможной скорости ветра для места строительства.