



Научно-исследовательский центр **СтаДиО**

АО НИИ **СтаДиО**

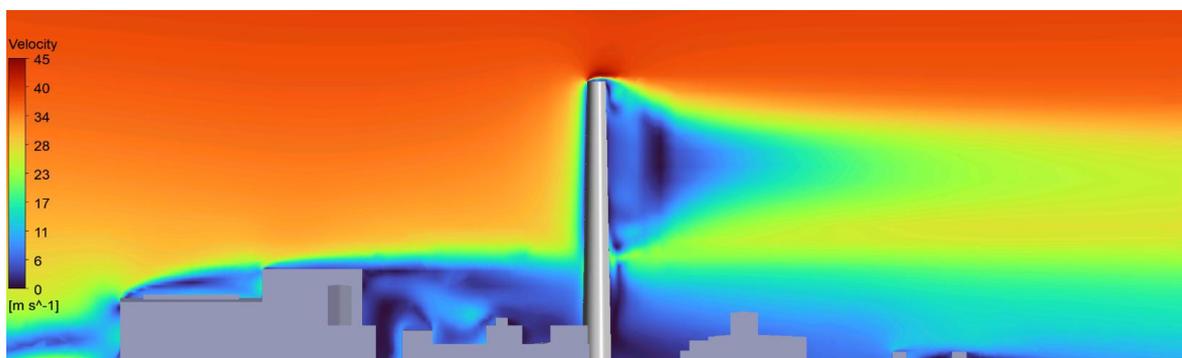
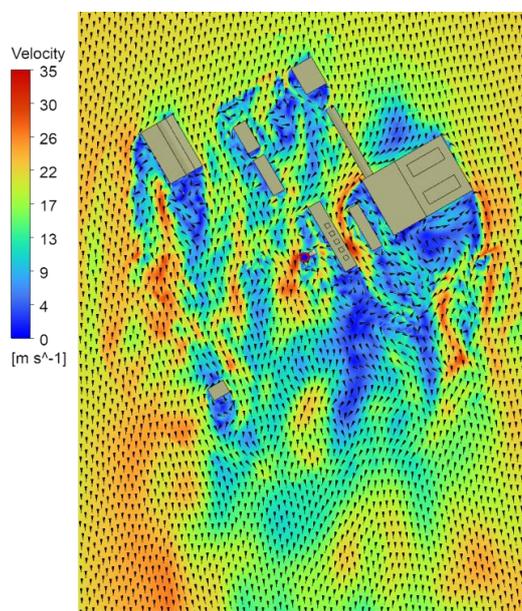
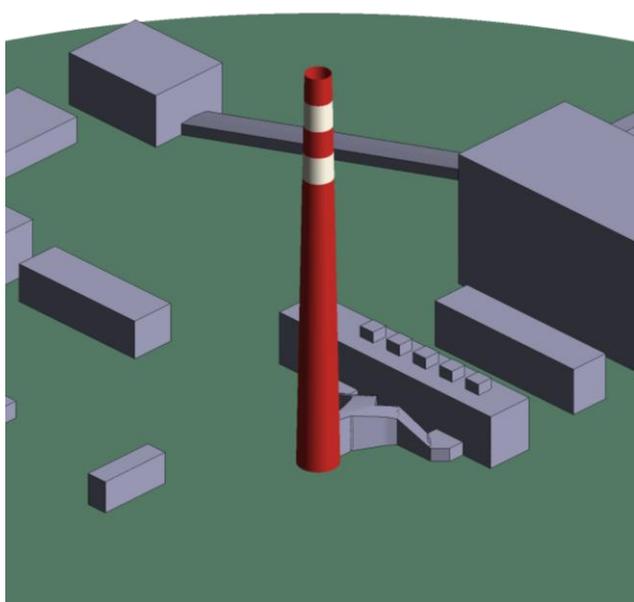
Свидетельство СРО «АПОЭК» - Ассоциации «Проектировщики оборонного и энергетического комплексов»
Номер решения о приеме в члены СРО № 06-ПСС-38/2018 от 20.06.2018 г.

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. № ПСК-06/20-1

Научно-технический отчет

Разработка рекомендаций по назначению ветровых нагрузок на Дымовую трубу (инв. №56084). ПАО «НЛМК»



1. Исходные данные. Постановка задач

Постановка задач расчетных исследований

В соответствии с техническим заданием и по результатам анализа и обобщения нормативной и проектной документации Объекта ставятся и решаются следующие задачи:

1. Разработка трехмерной численной модели аэродинамики Объекта с учетом окружающей застройки для 24-х направлений ветра.
2. Численное моделирование распределения интегральных ветровых давлений на несущие конструкции Объекта.
3. Исследование возможности возникновения вихревого возбуждения Объекта и его интенсивности.

Площадка строительства, рельеф и застройка объекта

Площадка строительства Объекта располагается на территории Новолипецкого металлургического комбината в Левобережном округе города Липецк, неподалёку от пересечения Грязинского шоссе и Владимирской улицы. Участок ограничен заводскими строениями и железнодорожными путями с севера (ст. Агломератная), юга (ст. Новолипецк) и востока, с запада – территорией прилегающего завода стиральных машин Индезит. Можно заключить, что застройка оказывает существенное аэродинамическое влияние на Объект.

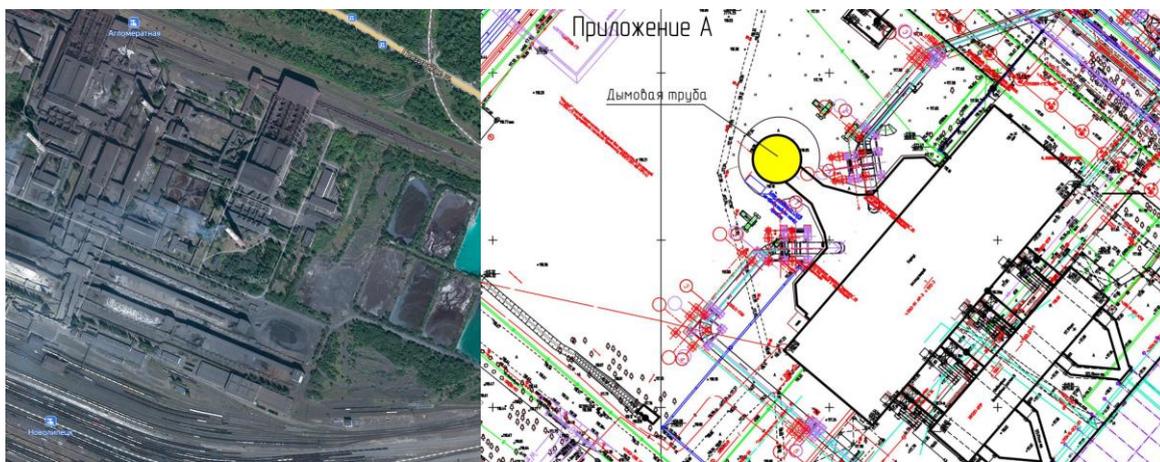


Рис. Карта местности возле площадки строительства (слева)
и мастер-план Объекта (справа)

Локальный рельеф местности в радиусе 500 м от Объекта практически ровный. Таким образом, для исследования аэродинамики объекта целесообразно учитывать только окружающую застройку.

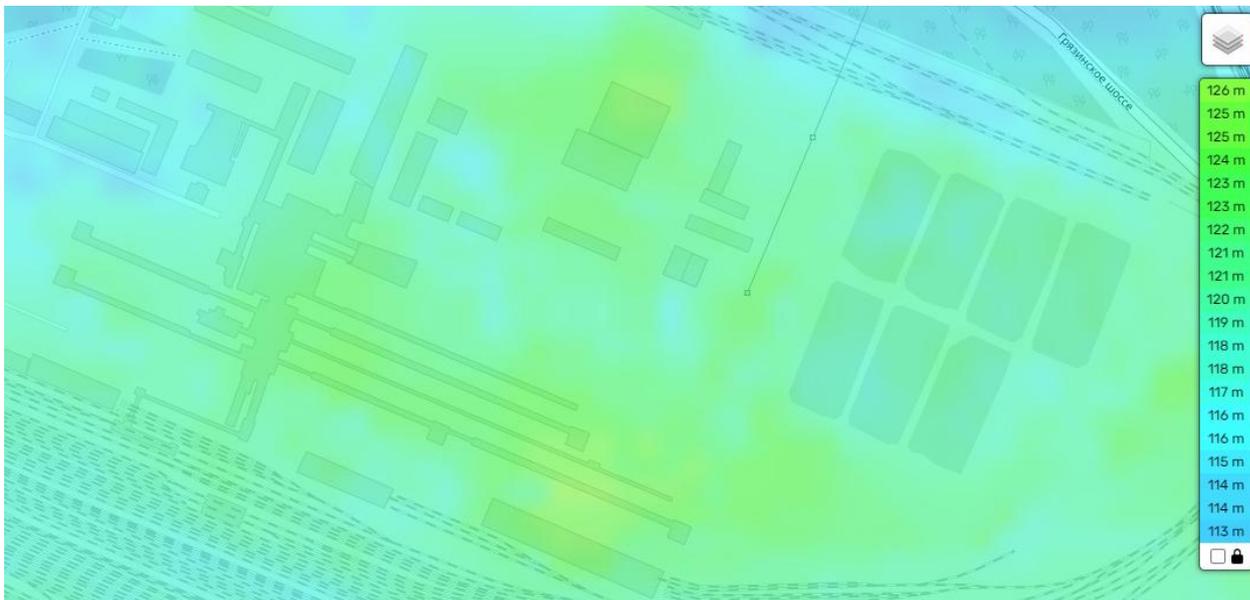


Рис. Карта высот возле площадки строительства по данным Topographic-Map.com

Климат в г. Липецк умеренно-континентальный, с холодной зимой и умеренно жарким летом. Преобладающими являются северо-западное, западное и юго-западное направления ветра. Среднемесячная скорость ветра составляет примерно 4 м/с.

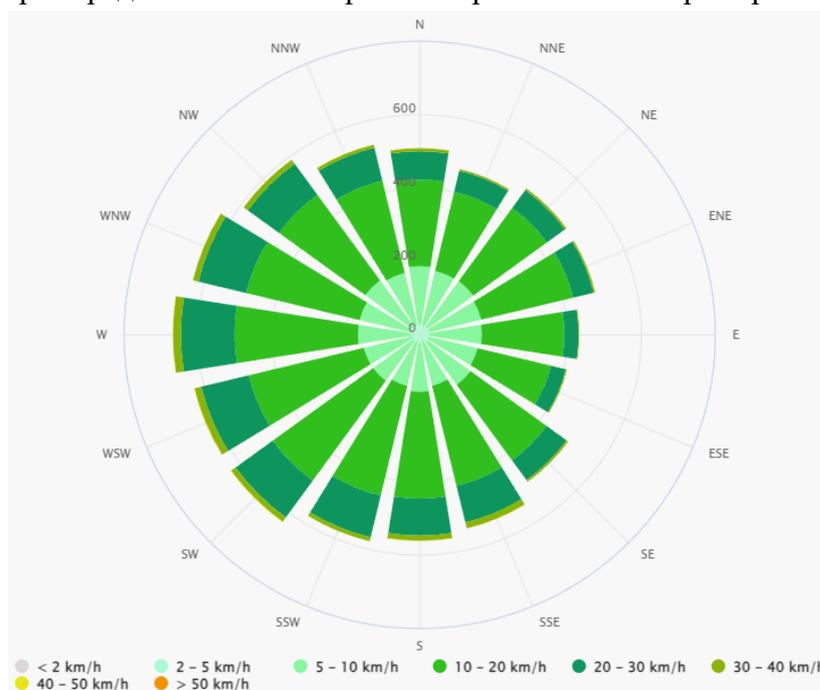


Рис. Роза скоростей ветра для г. Липецк (согласно метео данным meteoblue.com)

Согласно СП 20.13330.2016 площадка строительства находится в **II ветровом районе** (нормативное значение ветрового давления $w_0 = 0.3 \text{ кПа}$). При определении ветровых нагрузок следует принять тип местности **B**, т.к. Объект окружен низкоэтажной окружающей застройкой.

Краткая характеристика исследуемого Объекта

Объект представляет собой отдельно стоящую монолитную железобетонную полую трубу, имеющую форму усечённого конуса, высотой 150 м. В соответствии с проектом

предусмотрены восемь светофорных площадок, фактически труба оснащена четырьмя светофорными площадками. С отметки +143,750 предусмотрены десять ходовых лестниц для обслуживания молниеприёмников. Система молниезащиты состоит из девяти молниеприёмников и двух молниеотводов из стали круглого проката диаметром 12 мм. Оголовок дымовой трубы защищён колпаком, состоящим из отдельных чугунных звеньев. Конструктивная схема дымовой трубы – оболочковая.

Ствол трубы запроектирован монолитным железобетонным с переменным внутренним радиусом, рёбра жёсткости в виде монолитных поясов по внутренней части конструкции и футеровкой. Проектный наружный диаметр основания обследуемой трубы равен 14680 мм, диаметр оголовка равен 9180 мм. Диаметр устья равен 8000 мм. Ствол трубы по высоте имеет переменную толщину.

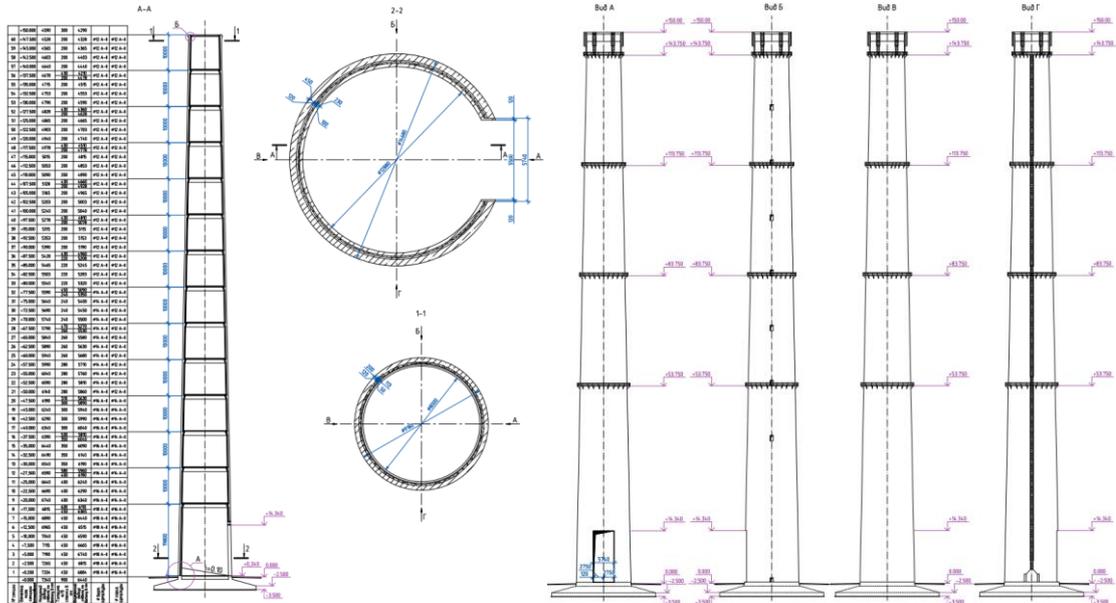


Рис. Дымовая труба, разрезы А-А, 1-1 и 1-2. Таблица наружных и внутренних радиусов ствола по бетону (слева), виды А, Б, В и Г (справа)

2. Численные модели и методики

Методики моделирования ветровых воздействий

Определение интегральных ветровых нагрузок на несущие конструкции объекта на основе численного моделирования выполнено в соответствии с разделами 5.1, 5.2 СТО «Численное моделирование ветровых и снеговых воздействий».

Исследования ветровых нагрузок проводились для 24-х направлений ветра (от 0° до 345° с шагом 15°, см. рис. 3.1) в стационарной постановке, а для выявленного наиболее опасного направления ветра – в нестационарной постановке.

Описание разработанной численной модели для ветровых нагрузок приведено в следующих разделах.

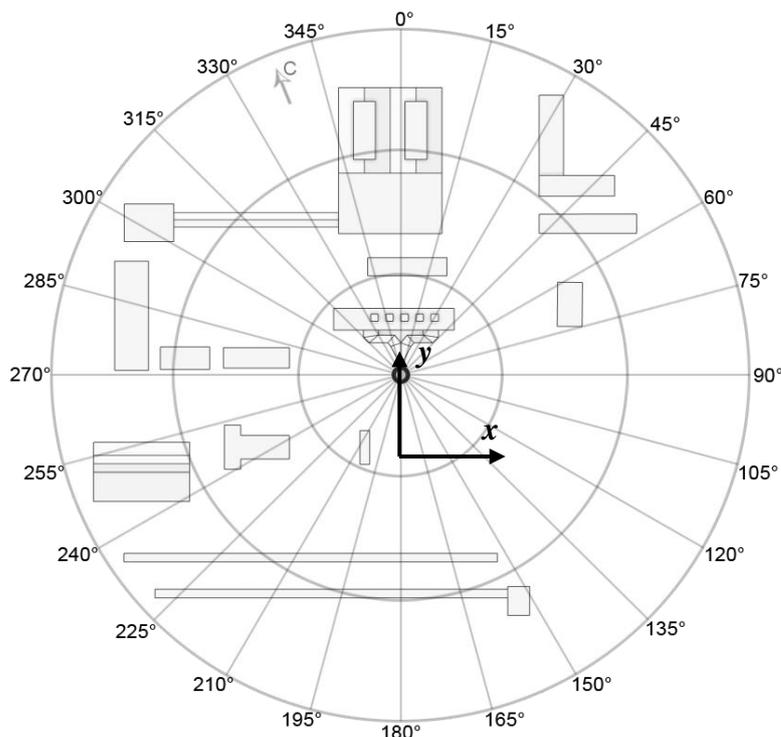


Рис. Схема исследуемых направлений ветра

Математические модели

Моделирование ветровых потоков проводилось на основе численного решения усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса в предположении постоянства плотности и вязкости воздуха и отсутствия гравитационных сил (см. Приложение Г к СТО).

Для замыкания уравнений в стационарной постановке (RANS) используется двухпараметрическая комбинированная модель турбулентности $SST k-\omega$, а для нестационарной постановки – SAS SST (URANS модель 2-го поколения).

Параметры расчетной области

Практическая подготовка численных моделей начинается с создания геометрии расчетной области вокруг Объекта и окружающей застройки. Геометрия Объекта выполнена согласно исходным данным, а существующая окружающая застройка – на основе открытых GIS-данных. Окружающая застройка учитывается в радиусе 300 м от Объекта (рис. 3.2) в упрощенном виде.

Расчетная область разделена на 2 части: внутреннюю цилиндрическую радиусом 500 м и внешнюю прямоугольную (рис. 3.3). Высота обеих частей – 450 м. При смене направлений ветра внутренняя область остается неподвижной, а внешняя – поворачивается на соответствующий угол.

Расчетная область выполнялась в геометрическом масштабе 1:100 для достижения необходимых параметров дискретизации пограничного слоя.

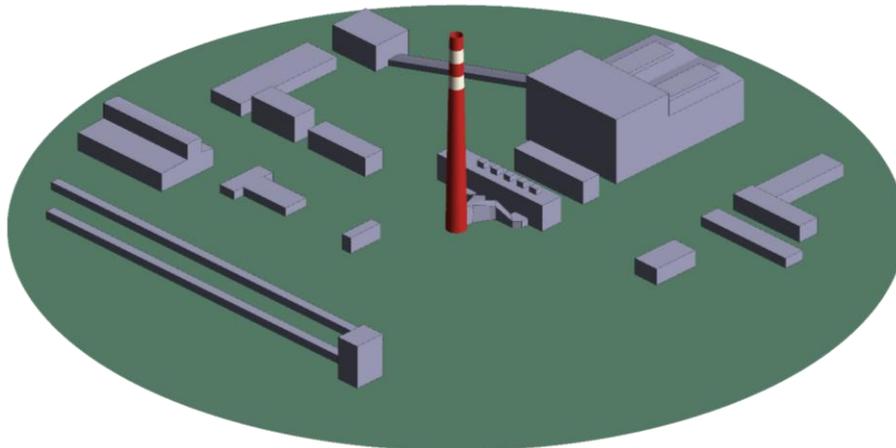


Рис. Расчетная область численной модели.
Общий вид (без окружающей прямоугольной области)

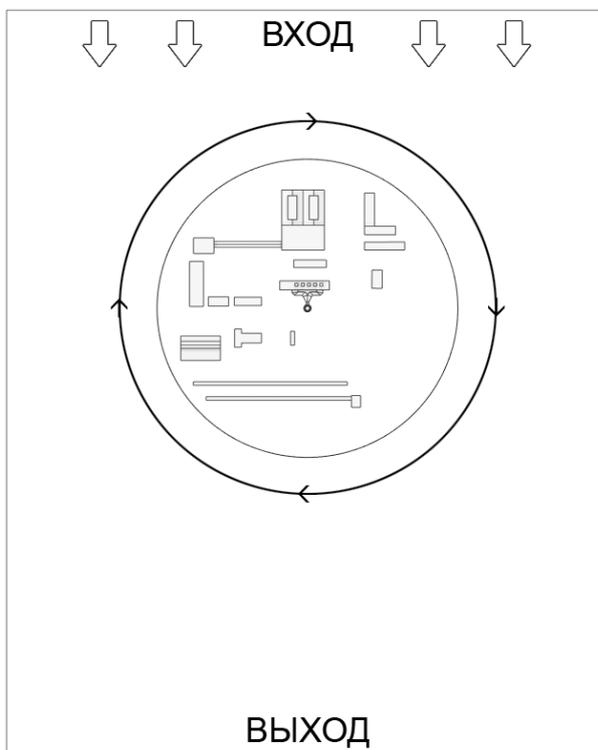


Рис. Расчетная область со схемой поворота внешней части домена

Параметры конечнообъемной сетки

Дискретизация расчетной области конечнообъемной сеткой проводится в ANSYS Fluent Meshing. Во внутренней части расчетной области используется эффективная в вычислительном смысле конечнообъемная сетка из полигексогональных конечных объемов (КО). Во внешней части расчетной области используются призматические конечные объемы. Связь между внутренней и внешней частью расчетной области осуществляется через специальный интерфейсный алгоритм передачи искомым функций.

Параметры используемой для расчетов конечнообъемной сетки представлены в табл. 3.1. Визуализация конечнообъемной сетки представлена на рис. 3.5-3.7.

Таблица Параметры конечнообъемных сеток

<i>Местоположение</i>	<i>Размер КО у поверхностей, м</i>	<i>Размер КО в объеме, м</i>
-----------------------	----------------------------------------	----------------------------------

<i>Модель 1</i> для определения средних ветровых нагрузок (~3.6 млн. КО)		
Объем в непосредственной близости от Объекта	0.25	1.0
Области, удаленные от Объекта	1.0-8.0	2.0-16.0
Внешний объем (прямоугольный)	-	16.0

Пограничный слой возле поверхностей Объекта, застройки и земли дискретизировался рядом тонких (в нормальном к поверхности направлении) конечных объемов.

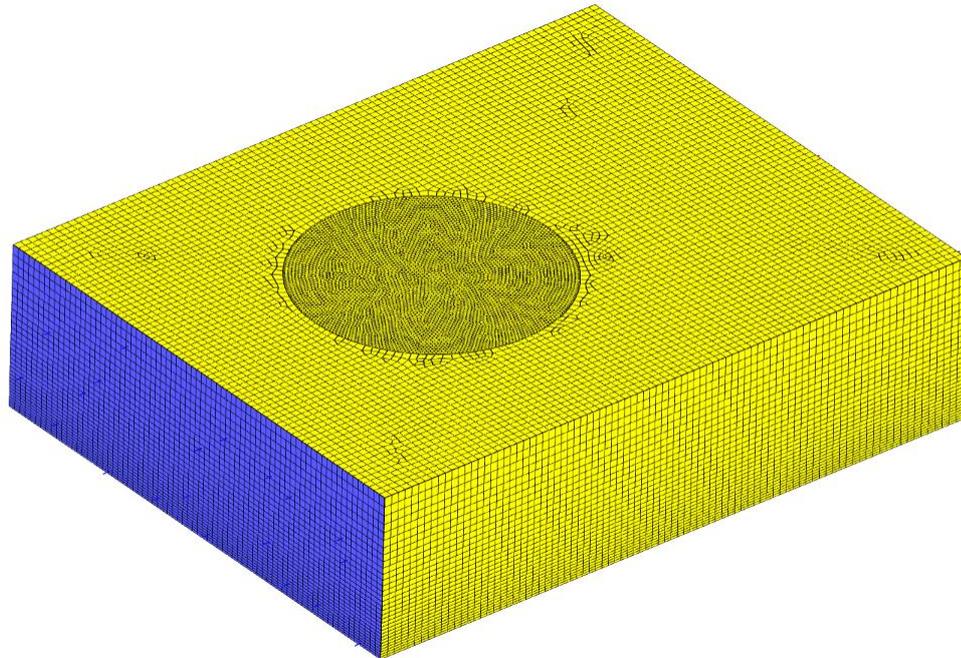


Рис. Конечнообъемная сетка

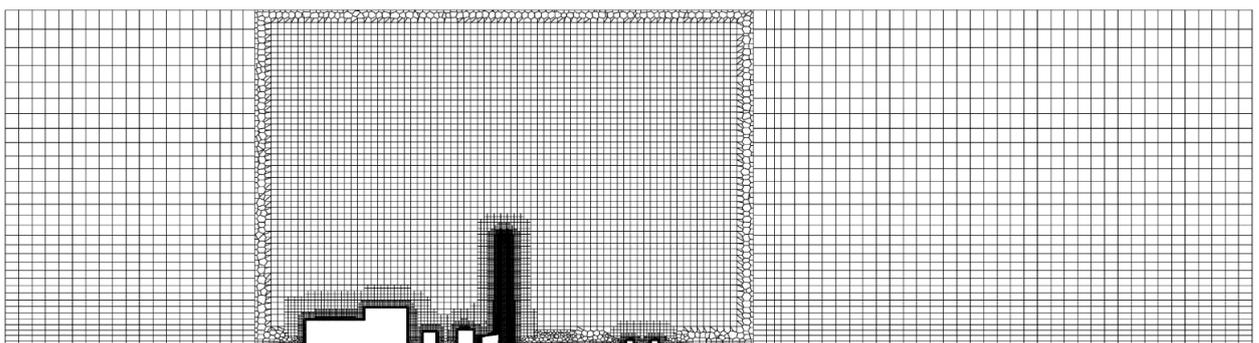


Рис. Разрез конечнообъемной сетки

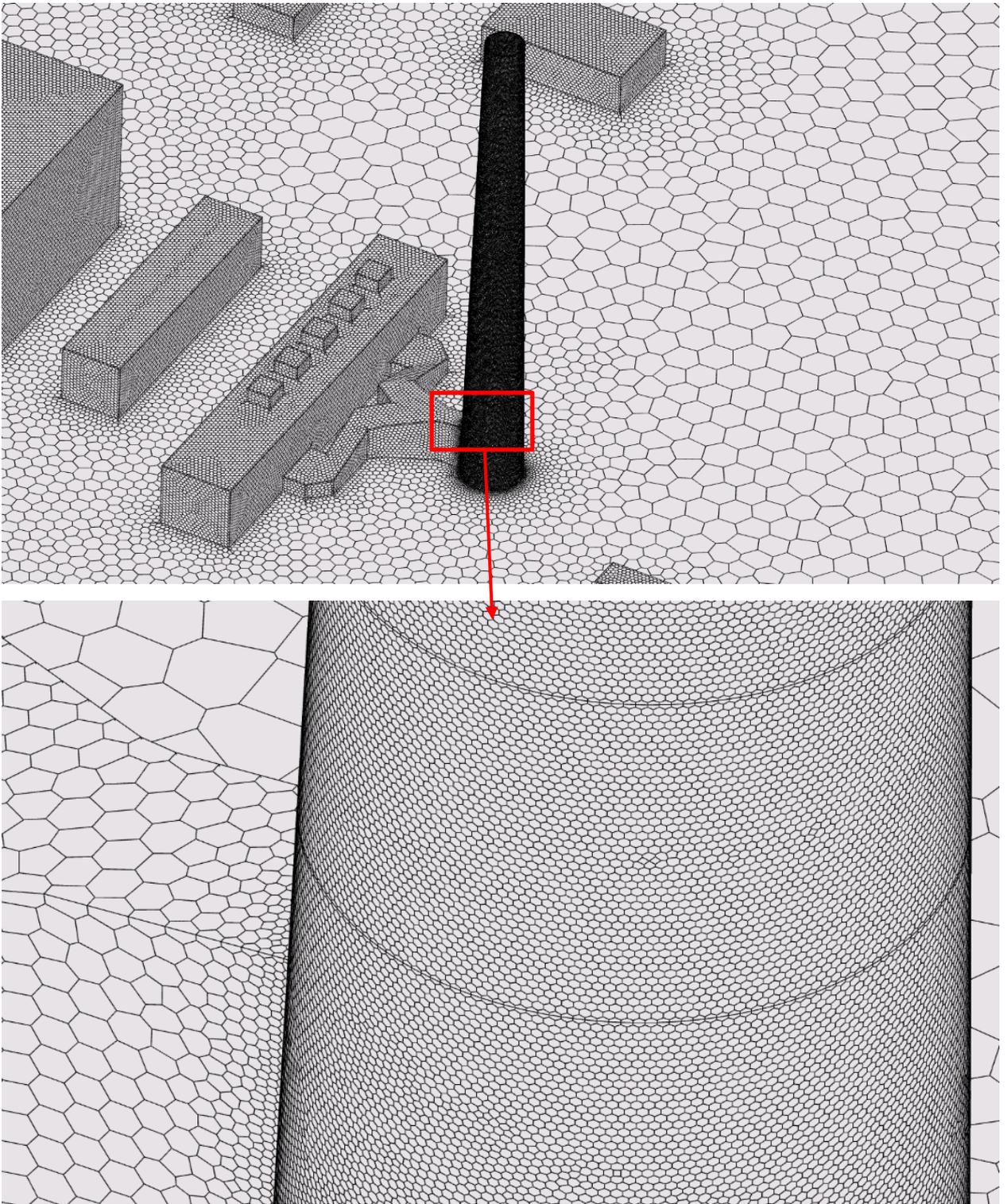


Рис. Поверхностная сетка

Граничные условия

Граничные условия на «входе» (*INLET*) расчетной области соответствуют 2-му ветровому району, типу местности В:

$$U(z) = U_{10} \left(k_s \frac{z}{10} \right)^\alpha,$$

где:

$U_{10} = \sqrt{2\gamma_f k_{10} w_0 / \rho_{air}}$ – средняя скорость на высоте 10м;

k_{10}, α – коэффициенты типов местности (2-ой ветровой район, тип местности В по табл. 11.3 в СП 20).

k_s – масштабный коэффициент, равный 100.

На «выходе» (*OUTLET*) назначаются «мягкие» граничные условия с нулевыми дополнительными давлениями.

Верхней и боковым границам расчетной области назначается граничное условие *SYMMETRY* (нулевые производные по нормали для всех искомым величин), в данном случае моделирующее невозмущенность потока.

На «земле» и зданиях задано условие «стенки с прилипанием» (No-Slip Wall, $U = V = W = 0$ м/с), исключающее проникновение вещества через поверхность.

Параметры численных схем

Численное решение в стационарной постановке проводилось на основе псевдо-нестационарного метода. Схема связи скорость-давление – Coupled. Общее количество итераций для каждого направления ветра – 300. Сбор статистики для получения осреднённых искомым величин проводился на последних 75 итерациях.

Численное решение в нестационарной постановке проводилось с использованием схемы связи скорость-давление SIMPLEC и шагом по времени $\Delta t = 0.0001$ с (0.01 с в натурном масштабе)

Для уравнений моментов, давлений и переноса турбулентных характеристик использовались численные схемы 2-го порядка точности.

3. Определение ветровых нагрузок и анализ вихревого возбуждения

В данном разделе приведены основные результаты выполненных расчетных исследований по определению средних ветровых нагрузок на несущие конструкции Объекта, чисел Струхаля и соответствующих амплитуд аэродинамических коэффициентов.

Численное моделирование ветровых нагрузок и анализ параметров вихревого возбуждения проведены в соответствии с СТО.

Стационарные расчеты использовались для выявления наиболее опасного направления ветра. Нестационарные – для определения итоговых нагрузок, аэродинамических коэффициентов и числа Струхаля для выявленного опасного направления ветра.

Приведенные в главе значения основных ветровых нагрузок (средняя составляющая) являются **расчетными** (с учетом коэффициента надежности по нагрузке $\gamma_f = 1.5$ в соответствии с СП 375.1325800). Все ветровые нагрузки вычислялись с учетом давления на внешние и внутренние поверхности трубы.

Ветровые нагрузки на несущие конструкции

В разделе представлены следующие материалы:

- средние *интегральные* (на весь Объект) ветровые нагрузки (F_X, F_Y , кН) на несущие конструкции и векторная сумма нагрузки (F_R , кН) для 24-х направлений представлены в табличном виде (табл. 4.1) и в форме круговых диаграмм (рис. 4.1);

- *интегральные* (на весь Объект) опрокидывающие моменты силы (M_X, M_Y , МН·м) вокруг осей X и Y их векторная сумма (M_R , МН·м) представлены в табличном виде (табл. 4.2) и в форме круговых диаграмм (рис. 4.2);

- позонные (по секциям) интегральные ветровые нагрузки (F_X, F_Y, F_R , кН) для выявленного наиболее опасного направления ветра (300°) представлена в таблице 4.3.

Номенклатура компонент представлена на рис. 4.3.

Для учета пульсационной оставляющей ветровых нагрузок следует использовать методику, приведенную в Приложении М СП 20.13330, и реализованную во многих специализированных программных комплексах расчета строительных конструкций.

Исследование вихревого возбуждения

В соответствии с п. 11.3.1 СП 20.13330 для исследуемого Объекта необходимо учитывать возможность возникновения резонансного вихревого возбуждения ($\lambda_e = 2 \cdot 150\text{м} / 9.18\text{м} = 32.7 \geq 20$).

Для выявленного по результатам стационарных расчетов наиболее опасного направления ветра (300°) были проведены трёхмерных нестационарных аэродинамических расчеты с целью анализа вихревого возбуждения.

В разделе представлены определенные амплитудные спектры аэродинамических коэффициентов (рис. 4.5, а) и спектральные плотности интегральных ветровых нагрузок (рис. 4.5, б), а также результаты их анализа: энергонесущие числа Струхаля и амплитуды аэродинамических коэффициентов (табл. 4.4).

Пример получаемых в результате нестационарных расчетов векторных изополей скоростей показан на рис. 4.4.

Таблица Интегральные расчетные ветровые нагрузки (F_x , F_y) и векторная сумма нагрузки (F_R) в зависимости от направления ветра

Угол, °	M_x , МН·м	M_y , МН·м	M_R , МН·м
0	76.4	1.5	76.4
15	84.3	-30.6	89.7
30	76.1	-55.4	94.2
45	61.4	-72.1	94.7
60	51.6	-79.8	95.0
75	31.4	-90.9	96.2
90	-2.9	-90.5	90.5
105	-26.1	-90.2	94.0
120	-46.3	-79.0	91.5
135	-61.1	-62.5	87.3
150	-72.4	-43.3	84.4
165	-85.1	-19.5	87.2
180	-78.3	0.9	78.3
...
345	82.3	30.4	87.8

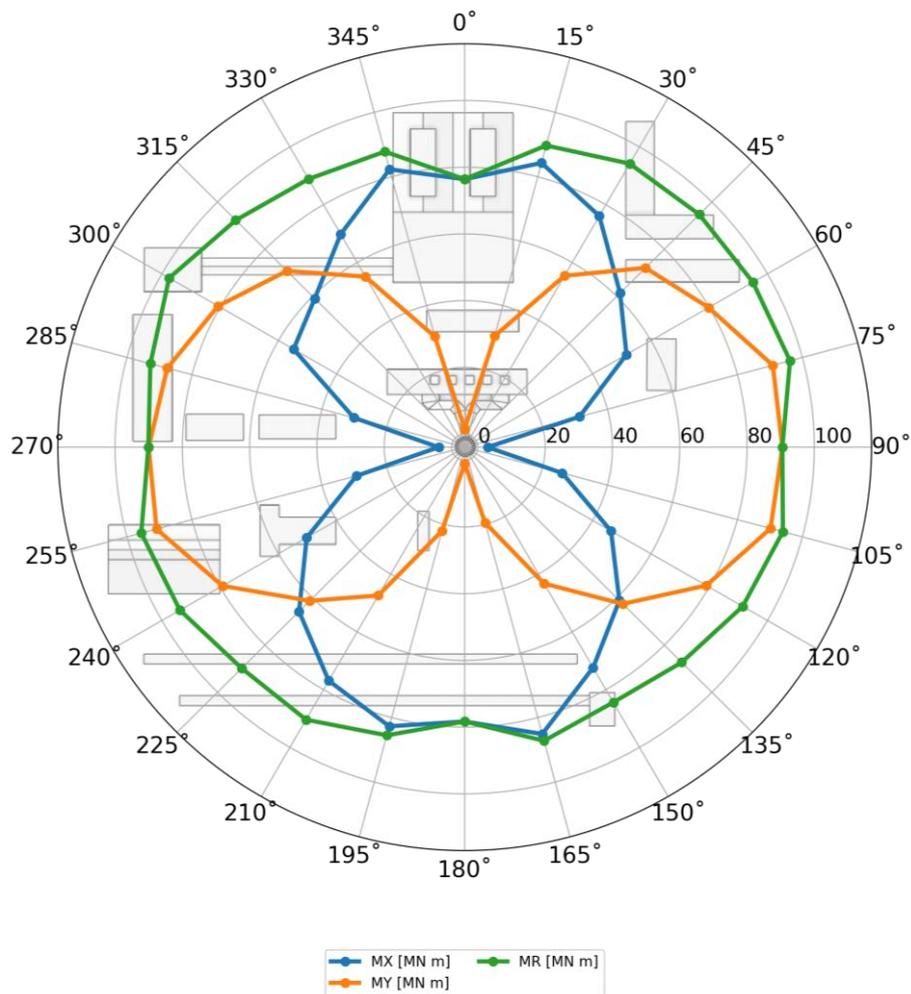


Рис. Опрокидывающие моменты (M_x , M_y) и векторная сумма моментов (M_R), МН·м (значения приведены по модулю)



Таблица Средняя составляющая ветровых нагрузок на секции Объекта для направления ветра 300°

Компонента	F _x , кН	F _y , кН	F _R , кН
T1	63.6	-40.1	75.2
T2	41.5	-23.3	47.5
T3	43.1	-25.0	49.8
T4	45.6	-24.6	51.9
T5	44.7	-12.3	46.3
T6	44.3	-68.3	81.3
T7	52.4	-31.2	61.0
T8	44.7	-25.3	51.3
T9	41.7	-23.9	48.0
T10	39.8	-23.3	46.1
T11	39.6	-22.6	45.6
T12	40.0	-22.2	45.8
T13	40.1	-22.3	45.9
T14	40.3	-22.1	46.0

Рис. Расположение именованных компонент Объекта

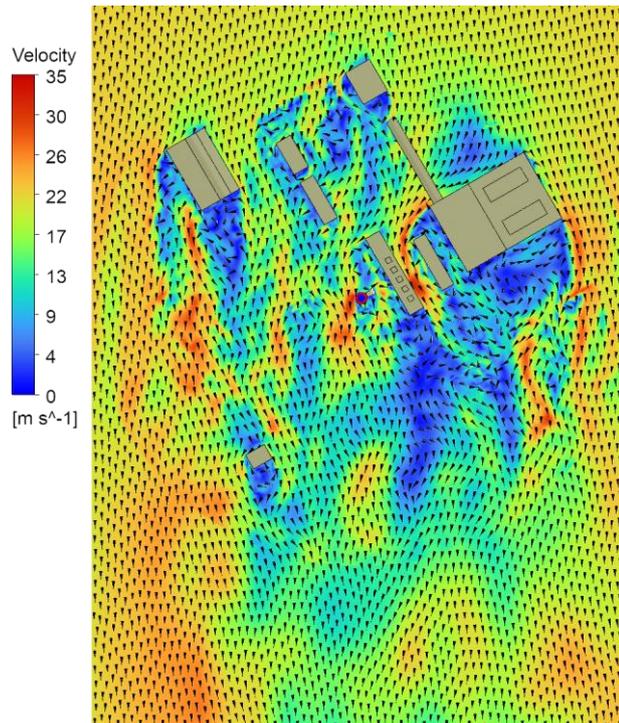
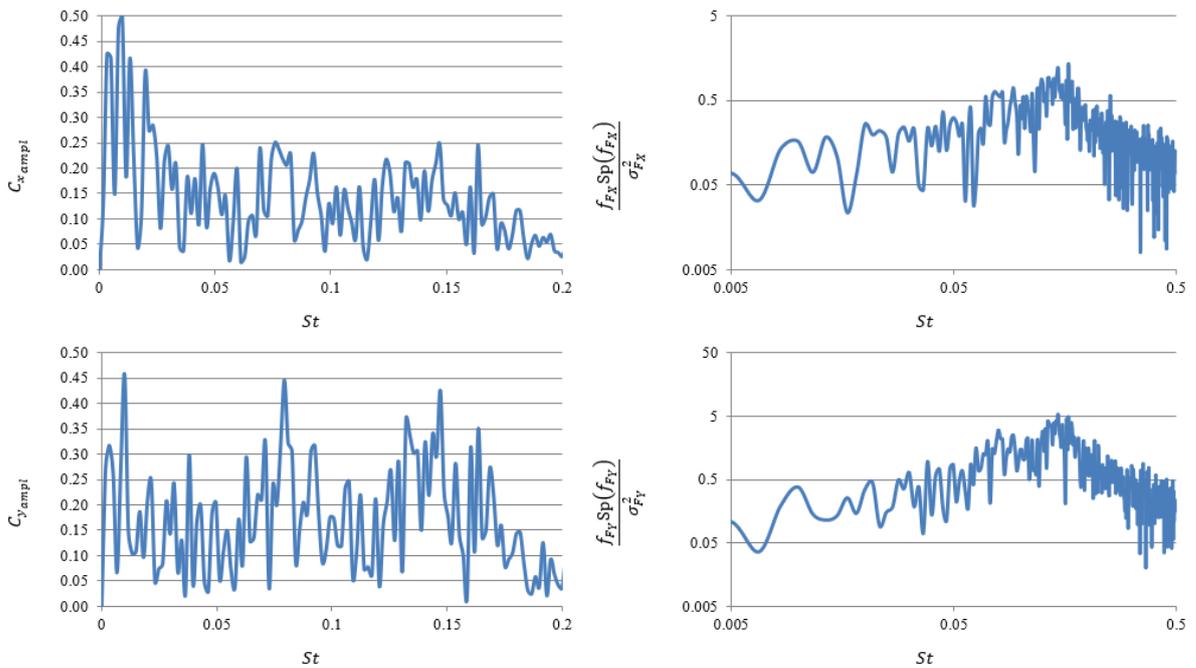


Рис. Изополя скоростей ветра [м/с] в фиксированный момент времени (стрелками показано направление скоростей в точках)

Таблица Значения чисел Струхали (St) и соответствующая амплитуда колебаний аэродинамических коэффициентов ($C_{X,ampl}$, $C_{Y,ampl}$)

C_X		C_Y	
St	$C_{X,ampl}$	St	$C_{Y,ampl}$
0.010	0.50	0.010	0.46
0.008	0.48	0.079	0.45
0.003	0.42	0.147	0.43
0.005	0.42	0.132	0.37
0.013	0.42	0.164	0.35
0.020	0.39	0.144	0.34
0.023	0.28	0.134	0.34
0.021	0.27	0.071	0.32
0.076	0.25	0.140	0.32
0.147	0.25	0.081	0.32



а) амплитудно-частотные спектры аэродинамических коэффициентов

б) спектральные плотности интегральных ветровых нагрузок

Рис. Результаты исследования вихревого возбуждения Объекта

Выводы и рекомендации

В результате выполненной АО НИЦ СтаДиО НИР, на тему «Разработка рекомендаций по назначению ветровых нагрузок на Дымовую трубу (инв. №56084). ПАО «НЛМК», можно сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. На основе анализа и обобщения исходных данных разработана и верифицирована численная модель аэродинамики Объекта для определения интегральных ветровых давлений на несущие конструкции с учетом существующей окружающей застройки.

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. Моделирование ветровых нагрузок проводилось для 24-х направлений ветра в стационарной постановке, а для выявленного наиболее опасного направления ветра – в нестационарной постановке.

3. В результате численного моделирования средних ветровых давлений при 24-х направлениях ветра с учетом окружающей застройки выявлено следующее:

– максимальное значение векторной суммы интегральных ветровых нагрузок F_R составляет **732.8 кН** и реализуется при направлении ветра **300°**;

– максимальное значение векторной суммы опрокидывающих моментов M_R составляет **97.5 МН·м** и также реализуется при направлении ветра **300°**;

Таким образом, при обосновании механической безопасности Объекта рекомендуется использовать ветровые нагрузки для ветра **300°** (табл. 4.3)

4. В соответствии с п. 11.3.1 СП 20.13330 для исследуемого Объекта необходимо учитывать возможность возникновения резонансного вихревого возбуждения ($\lambda_e = 2 \cdot 150\text{м} / 9.18\text{м} = 32.7 \geq 20$).

Трёхмерным нестационарным аэродинамическим расчётом определены числа Струхаля и соответствующие аэродинамические коэффициенты резонансного вихревого возбуждения.

В случае подтверждения возможности возникновения резонансного вихревого возбуждения при расчете конструкций на усталостную прочность **рекомендуется** руководствоваться п. 11.3 и В.2 СП 20.13330.2016, приняв значение числа Струхаля **St = 0.155** и значения аэродинамических коэффициентов вдоль направления ветра **0.74**, поперек – **0.40** (амплитуда).