

Методическое пособие
**«Математическое (численное) моделирование
ветровых нагрузок и воздействий»**

Руководитель темы:
генеральный директор ЗАО НИЦ СтаДиО,
докт. техн. наук, член-корр. РААСН

_____ А.М. Белостоцкий

Москва 2020

Предисловие

Сведения о методическом пособии

1 ИСПОЛНИТЕЛИ – ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО»
(ЗАО НИЦ СтаДиО)

2 ЦЕЛЬ РАБОТЫ – обеспечение механической безопасности строительных объектов, сокращение сроков и снижение стоимости их проектирования за счёт использования передовых автоматизируемых технологий математического (численного) моделирования ветровых нагрузок и воздействий.

3 ВВЕДЕНО ВПЕРВЫЕ

Содержание

1 Область применения.....	6
2 Нормативные ссылки	6
3 Термины, определения, обозначения и единицы измерения.....	7
3.1 Термины и определения	7
3.2 Обозначения и единицы измерения.....	10
4 Общие требования	14
5 Численное моделирование ветровых воздействий на здания, сооружения и комплексы.....	18
5.1 Теоретические основы математического (численного) моделирования ветровых нагрузок и воздействий.....	18
5.2 Требования к расчётной модели	22
5.3 Схема расчётных исследований	26
5.4 Расчётная оценка средней и пульсационной составляющей ветровых нагрузок.....	30
5.5 Расчётная оценка пиковых ветровых давлений на ограждающие конструкции	32
5.6 Расчётная оценка пешеходной комфортности	33
5.7 Программная реализация численной методики определения ветровых воздействий	36
6. Примеры использования численной методики определения ветрового нагружения зданий, сооружений и комплексов	37
6.1 Расчётное определение ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции и параметров пешеходной комфортности многофункционального жилого комплекса	37
6.2 Расчётное определение аэродинамических коэффициентов на промышленное сооружение (копер ствола рудника)	52
6.3 Расчётное определение средних и пульсационных составляющих ветровых нагрузок на несущие конструкции ветроэнергетической установки с фиксированными лопастями	65

Библиография	76
---------------------------	-----------

Введение

Методическое пособие разрабатывается в развитие положений СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» в части математического (численного) моделирования ветровой аэродинамики на основе численных схем решения трёхмерных уравнений движения жидкости и газа с адекватными моделями турбулентности, реализованных в современных верифицированных лицензионных программных комплексах вычислительной гидрогазодинамики.

В Пособии представлены теоретические основы математического (численного) моделирования ветровых нагрузок (основной и пиковой) и параметров пешеходной комфортности, а также требования к расчётным моделям, схема (порядок) расчётных исследований и интерпретации их результатов, особенности программной реализации численной методики.

Пособие содержит также примеры математического (численного) моделирования ветровых нагрузок / воздействий и параметров пешеходной комфортности для представительного набора объектов: жилого комплекса, промышленного и энергетического объектов.

Пособие разработано авторским коллективом ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО» (д.т.н. А.М. Белостоцкий – рук. разработки, д.т.н. П.А. Акимов, к.т.н. И.Н. Афанасьева, инж. О.С. Горячевский, инж. И.Ю. Ланцова, инж. Н.А. Бритиков).

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ (ЧИСЛЕННОЕ) МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК И ВОЗДЕЙСТВИЙ**

1 Область применения

Рекомендации настоящего Пособия распространяются на расчёт ветровых нагрузок на несущие и ограждающие (фасадные) конструкции, на комплексы зданий и сооружений со значимым аэродинамическим взаимным влиянием и на все иные случаи, не представленные в Приложении В.1 СП 20.13330.2016 (иные очертания, учёт при надлежащем обосновании других направлений ветрового потока или составляющих общего сопротивления тела по другим направлениям, необходимость учёта влияния близстоящих зданий и сооружений, рельефа местности и т.п.) в соответствии с положениями ГОСТ 27751. Рекомендации также распространяются на разработку архитектурно-планировочных решений городских кварталов, а также планирование возведения зданий внутри существующих городских кварталов в части оценки параметров «ветровой» комфортности пешеходных зон.

2 Нормативные ссылки

В настоящем методическом пособии приведены ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований.
Основные положения

СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция
СНиП 2.01.07-85*

СП 296.1325800.2017 Здания и сооружения. Особые воздействия

СП 267.1325800.2016 Здания и комплексы высотные. Правила проектирования

СП 43.13330.2012 Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85

Примечание – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов (и классификаторов) на официальном интернет-сайте Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации (www.easc.by) или по указателям национальных стандартов, издаваемым в государствах, указанных в предисловии, или на официальных сайтах соответствующих национальных органов по стандартизации. Если на документ дана недатированная ссылка, то следует использовать документ, действующий на текущий момент, с учётом всех внесённых в него изменений. Если заменён ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, то следует использовать указанную версию этого документа. Если после принятия настоящего стандарта в ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение применяется без учёта данного изменения. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

Термины, определения, обозначения и единицы измерения

3.1 Термины и определения

В настоящем методическом пособии использованы следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 геометрическая модель: Замкнутая объёмная модель расчётной области воздуха вокруг исследуемого Объекта.

3.1.2 конечнообъёмная модель: Объёмная сетка, аппроксимирующая расчётную область воздуха вокруг исследуемого Объекта на основе метода конечных объёмов.

3.1.3 расчётная модель: Конечнообъёмная модель с заданными граничными и начальными условиями, свойствами воздуха и другими

необходимыми в конкретной задаче параметрами.

3.1.4 модель турбулентности: Математическая модель, используемая для моделирования эффектов турбулентности.

Наиболее употребительные / адекватные классы моделей турбулентности:

LES – Large Eddy Simulation (Моделирование Крупных Вихрей);

RANS / URANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes (Осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса). Наиболее распространенные модели данного класса: $(k - \varepsilon)$, $(k - \omega)$, SST и SAS-SST;

DES – Detached Eddy Simulation (Моделирование Отсоединённых Вихрей): является комбинацией LES и RANS.

3.1.5 огибающие пикового ветрового давления: Максимальные (минимальные) значения пикового ветрового давления среди всех направлений ветра в каждой точке поверхности здания или сооружения.

3.1.6 математическое моделирование: Технология обработки информации об интересующих нас объектах, предусматривающая изучение и прогнозирование их проявлений с использованием возможностей математики.

3.1.7 математическая модель: Основные закономерности и связи, присущие изучаемому явлению и выраженные в виде формул, уравнений, наборов правил или соглашений, записанных в математической форме.

3.1.8 программное средство (ПС): Программа (код), комплекс программ (программный комплекс, ПК), программно-алгоритмический комплекс, библиотека данных, самостоятельный программный модуль или их совокупность, предназначенные для численного моделирования проявления объектов, физических и других процессов.

3.1.9 верификация ПС: Обоснование возможности использования ПС, а также реализуемых в ПС моделей и методов в заявленной области применения, выявление погрешности оценки параметров моделируемых объектов путём сравнения результатов с экспериментальными данными, расчётными данными, полученными по альтернативным ПС, результатами аналитических тестов,

теоретического анализа; определение состава возможностей программы, соответствия действительных возможностей ПС декларациям разработчиков, требованиям организации, проводящей верификацию, правильности решения верификационных задач; оценка качества функционирования ПС и соответствия результатов расчёта тем моделям, которые положены в основу разработки

3.1.10 пограничный слой: Тонкий слой газа над поверхностью обтекаемого тела, в котором проявляются эффекты вязкости.

3.1.11 физическое время счёта: время, принятое в математической модели исследуемого процесса.

3.1.12 начальные условия: Условия, которым должно удовлетворять решение системы уравнений сплошной среды в начальный момент физического времени ($t = 0$) во всех точках пространства, занятого сплошной средой.

3.1.13 граничные условия: Условия, которые должны выполняться на границах сплошной среды в любой момент времени при её движении.

3.1.14 метод конечных объёмов: Численный метод решения задач сплошных сред, основанный на использовании интегральной формулировки законов сохранения. По сути, расчётная область с помощью сетки разбивается на совокупность контрольных объёмов. Узлы, в которых ищется решение, в частности, могут находиться в центрах указанных объёмов. Для каждого объёма должны выполняться законы сохранения массы, количества движения и энергии.

3.1.15 компонента сбора аэродинамической нагрузки: поверхность интегрирования ветрового давления и кинетической энергии турбулентности для определения суммарных ветровых нагрузок.

3.1.16 стационарный расчёт: аэродинамический расчёт в стационарной постановке (решение уравнений аэродинамики в предположении, что характеристики потока ветра не меняются со временем).

3.1.17 нестационарный расчёт: аэродинамический расчёт в нестационарной постановке (решение уравнений аэродинамики с учетом изменения характеристик потока ветра во времени).

3.2 Обозначения и единицы измерения

Таблица 3.2.1

Термин	Обозначение, единица измерения	Определение	Примечание
Суммарные расчетные ветровые нагрузки	F_x, F_y , кН	Проекция суммарной ветровой нагрузки на соответствующую горизонтальную ось	Вычисляются интегрированием по поверхностям всего сооружения
Векторная сумма нагрузки	F_R , кН	Суммарная ветровая нагрузка в горизонтальной плоскости	Вычисляются интегрированием по поверхностям всего сооружения
Суммарная вертикальная сила	F_Z , кН	Проекция суммарной ветровой нагрузки на вертикальную ось	Вычисляются интегрированием по поверхностям всего сооружения
Суммарный расчетный крутящий момент	M_Z , кН·м	Суммарный момент от ветровых нагрузок относительно вертикальной оси сооружения, проходящей через геометрический центр	Вычисляются интегрированием по поверхностям всего сооружения

Таблица 3.2.1 Продолжение

Термин	Обозначение, единица измерения	Определение	Примечание
Средняя составляющая ветрового давления	P , Па (кПа)	Осреднённое по времени значение ветрового давления	-
Пульсационная составляющая ветрового давления	P_{puls} , Па (кПа)	Вычисленная пульсационная компонента ветрового давления	Вычисляется по результатам стационарного расчета
Суммарное ветровое давление	P_{sum} , Па (кПа)	Сумма средней и пульсационной составляющих	-
Максимальное и минимальное значения ветрового давления	P_{max} , P_{min} , Па (кПа)	Вычисленные максимум и минимум ветрового давления по времени	-

Таблица 3.2.1 Продолжение

Термин	Обозначение, единица измерения	Определение	Примечание
Положительная и отрицательная пульсационные составляющие ветрового давления	$P_{puls,+}$, $P_{puls,-}$, Па (кПа)	Разности максимального (минимального) значения и средней составляющей ветрового давления	Вычисляется по результатам нестационарного расчета
Средняя составляющая погонной ветровой силы	f , кН/м	Собранное на линию среднее ветровое давление	-
Пульсационная составляющая погонной ветровой силы	f_{puls} , кН/м	Собранное на линию пульсационное ветровое давление	-
Суммарная составляющая погонной ветровой силы	f_{sum} , кН/м	Собранное на линию суммарное ветровое давление	

Таблица 3.2.1 Окончание

Коэффициент «пульсаций»	k_{puls}	Отношение пульсационной составляющей ветровой нагрузки к её средней составляющей	
Среднеквадратичное отклонение (стандарт) ветровых давлений	σ_p , Па	Квадратный корень из суммы квадратов разностей ветрового давления, вычисленного в точке, и среднего ветрового давления	Статистическая величина Вычисляется по результатам нестационарного расчета
Коэффициенты обеспеченности	$\theta_{min}, \theta_{max}$	Характеристика диапазона разброса давлений	
Кинетическая энергия турбулентности	$TKE, м^2/с^2$	Средняя кинетическая энергия вихрей в турбулентном потоке	

4 Общие требования

4.1 При определении ветрового нагружения проектируемых зданий, сооружений и комплексов необходимо руководствоваться разделом 11 СП 20.13330 и разделом 6.6 СП 296.1325800.

Согласно п. 11.1.7 СП 20.13330 для сооружений повышенного уровня ответственности, которые указаны в [1], статья 48.1, часть 2 или в примечании 2, а также во всех случаях, не предусмотренных В.1 (иные формы сооружений, учёт при надлежащем обосновании других направлений ветрового потока или составляющих общего сопротивления тела по другим направлениям, необходимость учёта влияния близстоящих зданий и сооружений, рельефа местности и аналогичные случаи), аэродинамические коэффициенты устанавливаются в рекомендациях, разработанных с учётом 4.7 на основе результатов:

1) физического (экспериментального) моделирования – испытаний в аэродинамических трубах;

2) математического (численного) моделирования ветровой аэродинамики на основе численных схем решения трёхмерных уравнений движения жидкости и газа с адекватными моделями турбулентности, реализованных в современных верифицированных лицензионных программных комплексах вычислительной гидрогазодинамики.

Согласно п. 11.2 СП 20.13330 «аэродинамические коэффициенты $c_{p,+}$ и $c_{p,-}$ определяются на основе результатов модельных испытаний сооружений в аэродинамических трубах, численного моделирования или с учётом данных, опубликованных в технической литературе».

4.2 При определении ветрового нагружения необходимо учитывать [16]:

– объёмно-планировочные, архитектурные и конструктивные решения проектируемых зданий, сооружений и комплексов;

– локальный рельеф местности природного и техногенного характера;

– влияние близкорасположенных зданий и сооружений (окружающую застройку);

– влияние технологического оборудования и трубопроводов (пп. 8.1.7 СП 43.13330);

– метеорологическую информацию о районе строительства.

4.3 При определении расчётных направлений ветра следует помимо прочих рассмотреть направления ветра, параллельные главным осям здания / сооружения.

4.4 При определении параметров «ветровой» комфортности пешеходных зон помимо факторов из п. 4.2 также необходимо учитывать существующие и планируемые зеленые насаждения, рекламные щиты и малые архитектурные формы.

4.5 При проектировании зданий, сооружений и комплексов необходимо определять:

4.5.1 Ветровые нагрузки на несущие конструкции [34]:

– средняя и пульсационная (амплитуда или полуразмах) составляющие суммарных расчётных ветровых нагрузок на несущие конструкции в осях здания или сооружения [9, 10], либо в осях ветра (например, F_x – сила лобового сопротивления, F_y – сила поперёк потока ветра, векторная сумма нагрузки (F_R) и крутящий момент относительно центральной оси здания (M_z) для расчётных направлений ветра;

– средняя (f), пульсационная (амплитуда или полуразмах, f_{dyn}) составляющие погонной ветровой силы и коэффициент «пульсаций» ($k_{puls} = f_{puls} / |f|$) на перекрытия каждого этажа здания или сооружения для расчётных направлений ветра;

– средняя (P), пульсационная (амплитуда или полуразмах, P_{puls}) составляющие ветрового давления и коэффициент «пульсаций» ($k_{puls} = P_{puls} / |P|$)

на поверхностях покрытия здания или сооружения для расчётных направлений ветра;

– (при необходимости) значения аэродинамического коэффициента c на поверхностях здания или сооружения для расчётных направлений ветра;

– в случаях, когда здание, сооружение или его часть имеет конструктивную схему, для которой принципиально невозможно определение погонных ветровых нагрузок, следует определять среднюю (P), пульсационную (P_{puls}) составляющие ветрового давления и коэффициент пульсаций на поверхностях исследуемого объекта.

– для башенных сооружений, мачт, труб, решетчатых конструкций и т.п. следует определять среднюю (f), пульсационную (амплитуда или полуразмах, f_{puls}) составляющие погонной ветровой силы и коэффициент «пульсаций» ($k_{puls} = f_{puls} / |f|$) по длине сооружения.

4.5.2 Ветровые нагрузки на ограждающие (фасадные) конструкции:

– огибающие максимального и минимального значений давления на ограждающие (фасадные) конструкции для всех направлений ветра;

– огибающие вычисленных поэтажно максимальных и минимальных значений ветрового давления на ограждающие (фасадные) конструкции; картины верхней огибающей максимальных значений ветрового давления, нижней огибающей минимальных значений ветрового давления и соответствующих углов атаки ветра, при которых реализуются эти огибающие;

– средняя и пульсационная составляющие расчётных величин ветрового давления на ограждающие (фасадные) конструкции для наиболее опасных направлений ветра.

4.5.3 Ветровые воздействия в пешеходных зонах (оценка пешеходной комфортности):

– расчётные поля коэффициентов усиления скоростей ветра (относительные скорости ветра в порывах) в пешеходной зоне (на высоте 1.5 м)

и вычисленные уровни пешеходной комфортности (повторяемость скорости ветра в порывах) по трём нормативно регламентированным критериям (для г. Москвы [3]);

4.5.4 Возможность возникновения аэроупругой неустойчивости зданий, сооружений (размеры которых соответствуют условию $h/d > 7$, где h – высота, d – поперечный минимальный размер) и их отдельных конструктивных элементов [13, 19, 22]:

- резонансное вихревое возбуждение;
- галопирование и галопирование в спутной струе;
- дивергенция (для зданий с несимметричной формой поперечного сечения типовых этажей, а также в тех случаях, когда центр масс типовых этажей не совпадает с их центром жёсткости);
- флаттер (для рекламных щитов, установленных на зданиях и сооружениях, а также для навесных фасадных конструкций).

4.5.5 Уровень комфортности пребывания людей в зданиях (динамическая комфортность) при действии ветровой нагрузки. Согласно СП 20.13330 при оценке динамической комфортности в качестве расчётной ветровой нагрузки принимается нормативное значение её пульсационной составляющей, умноженной на коэффициент 0.7: $0.7 f_{n,puls}$, $0.7 P_{n,puls}$.

5 Численное моделирование ветровых воздействий на здания, сооружения и комплексы

5.1 Теоретические основы математического (численного) моделирования ветровых нагрузок и воздействий

Расчёты ветровых потоков и воздействий сводятся к численному решению трёхмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики в постановке Навье-Стокса [5-6]:

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right]\end{aligned}\quad (5.1.1)$$

Кроме того, должны удовлетворяться уравнения неразрывности (сохранения массы) и состояния:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (5.1.2)$$

$$\rho = const \quad (5.1.3)$$

Здесь u , v , w – искомые компоненты вектора скорости (по осям x , y , z), p – давления, t – время, μ – динамический коэффициент вязкости для воздуха, ρ – плотность.

Для упрощения моделирования ветровые потоки предполагаются несжимаемыми и изотермическими, массовые силы не учитываются [4].

Прямое решение уравнений (5.1.1) - (5.1.3) с учётом вихрей всех масштабов (DNS, Direct Numerical Simulation) при современных возможностях ЭВМ практически реализуемо только для очень малых скоростей потока и чисто исследовательских задач.

Существуют следующие основные классы моделей турбулентности [7-8, 26, 30]:

– Large Eddy Simulation, LES (моделирование крупных вихрей): этот метод является вторым по трудоемкости из существующих подходов после DNS. Идея данного метода состоит в «фильтрации» характеристик турбулентного течения от коротковолновых неоднородностей – пространственном осреднении по областям с размерами порядка фильтра. Таким образом, вихревые структуры с размерами, превышающими размеры фильтра, решаются «точно», а вихревые структуры меньших размеров моделируются «подсеточными» моделями турбулентности;

– Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS / URANS (Осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса): в основе этого метода лежит полуэмпирический подход, основанный на разложении скорости на осреднённую во времени и пульсационную составляющие ($u_i(t) = \bar{u}_i + u_i'(t)$). В результате соответствующих преобразований уравнений Навье-Стокса появляются дополнительные неизвестные (т.н. сдвиговые «рейнольдсовы» напряжения). Система получается незамкнутой и требует дополнительных соглашений – «моделей турбулентности»;

– Detached Eddy Simulation, DES (метод моделирования отсоединённых вихрей): этот подход является комбинацией LES и RANS. Он заключается в том, что «отсоединённые» энергонесущие вихри, населяющие отрывные зоны, рассчитываются «точно» методом LES, а области присоединённых пограничных слоев описываются RANS моделями.

Для решения практических наукоёмких инженерных задач в современной расчётной практике преобладает применение моделей класса RANS / URANS. Система уравнений для RANS моделей:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i' u_j'} \right] \quad (5.1.4)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \dots, \frac{\partial u_i'}{\partial x_i} = 0,$$

где \bar{p} – среднее давление, индексы $i=1,2,3$ и $j=1,2,3$ соответствуют координатам x, y, z . Сдвиговые (рейнольдсовы) напряжения $\overline{\rho u_i' u_j'}$ являются дополнительными шестью неизвестными к параметрам осреднённого движения (\bar{u}_i, \bar{p}) и аппроксимируются, как правило, по гипотезе Буссинеска:

$$\overline{\rho u_i' u_j'} = -\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5.1.5)$$

где μ_t – дополнительная вязкость, вызванная пульсациями [23-24]; k – осреднённая энергия турбулентных пульсаций (*TKE*). Система является незамкнутой и требует дополнительных соглашений («моделей турбулентности»).

Решение уравнений (5.1.4) может проводиться как в нестационарной, так и в стационарной постановке. Стационарная задача сводится к итерационному решению редкозаполненной системы линейных алгебраических уравнений, с узловыми давлениями, компонентами скоростей и мерами локальной турбулентности (в частности, *TKE*) в качестве неизвестных.

По совокупности своих качеств одной из оптимальных RANS / URANS моделей является модель Ментера (Menter Shear Stress Transport Turbulence Model, сокращенно SST модель). SST модель представляет собой комбинацию $(k - \varepsilon)$ и $(k - \omega)$ [26] моделей турбулентности, обеспечивающую сочетание лучших качеств этих моделей. В частности, $(k - \varepsilon)$ модель хорошо зарекомендовала себя при расчете струйных и сдвиговых течений, а модель $(k - \omega)$ обеспечивает более точное описание пристеночных пограничных слоёв.

С учётом этих обстоятельств [27] Менгер предложил объединить эти модели с использованием специально сконструированной для этого эмпирической функции, которая обеспечивает близость суммарной модели к модели $(k - \varepsilon)$ вдали от твердых стенок и к модели $(k - \omega)$ в пристеночной части потока.

Более продвинутой по сравнению SST моделью, но вычислительно менее затратной, чем DES модели, является модель SAS-SST (Scale-Adaptive Simulation SST). Модель SAS-SST основывается на введении линейного масштаба Кармана в уравнение масштаба турбулентности, что позволяет воспроизвести LES-поведение в возмущённых областях потока (деформированных присутствующим в потоке телом). В невозмущённых областях потока модель ведёт себя так же, как модель SST.

5.2 Требования к расчётной модели

5.2.1 Размеры расчётной области воздуха

Для расчётной области воздуха в форме параллелепипеда боковая граница должна быть расположена на расстоянии не менее $5H$ от центра застройки (где H – высота самого высокого здания / сооружения), задняя граница области («выход», расположена по потоку за моделируемой застройкой) – не менее $10H$, передняя граница области («вход», расположена по потоку перед моделируемой застройкой) – не менее $5H$, верхняя граница области (высота расчётной области) – не менее $5H$.

Для расчётной области воздуха в форме цилиндра радиус составляет не менее $10H$.

5.2.2 Граничные условия

В качестве характеристик набегающего потока (граничные условия на «входе» (INLET)) задаются профили скорости ветра и характеристик турбулентности [20, 25] (кинетическая энергия турбулентности и энергия диссипации, интенсивность турбулентности и масштаб вихря), соответствующие расчетным значениям нагрузок с учётом коэффициента надёжности по нагрузке и отвечающие заданным ветровым районам и типам местности по СП 20.13330, локальным нормативным актам или на основе данных местных метеостанций. Масштаб турбулентности принимается равным 300 м.

На «выходе» (OUTLET) назначаются «мягкие» граничные условия по Нейману (равенство нулю производных) с нулевыми дополнительными давлениями и такими же параметрами турбулентности, как и на «входе».

На верхней и боковых (для расчётной области в форме параллелепипеда) границах расчётной области задаются условия симметрии потока.

На нижней границе расчётной области («земле») и на всех поверхностях зданий и сооружений задаётся условие «стенки с прилипанием» ($u = v = w = 0$ м/с), исключающее проникновение вещества через поверхность.

На поверхностях зданий и нижней границе расчётной области («земле») возможно задание эквивалентной шероховатости. Но для учёта шероховатости поверхностей рекомендуется вместо подбора пристеночных функций или коррекции их стандартных параметров применять по возможности «натуральное» моделирование (учёт в модели рельефа местности, балконов и оконных проёмов и т.п.).

5.2.3 Начальные условия

В качестве начальных условий во всей области задаются нулевые скорости ($u = v = w = 0$ м/с), нулевые дополнительные давления и характеристики турбулентности, соответствующие потоку на «входе»;

Либо в качестве начальных условий задаются результаты сошедшихся предварительных расчётов в стационарной постановке. Второй способ улучшает сходимость нестационарного решения.

5.2.4 Геометрическая модель

5.2.4.1 Объёмная геометрическая модель здания, сооружения или комплекса выполняется согласно исходным данным – архитектурным и конструктивным чертежам. При создании трёхмерной геометрической модели объекта детализация выбирается в соответствии с поставленной задачей:

– подробная детализация при создании геометрии здания / сооружения, воспроизведение реальной формы фасадов (балконов, оконных проёмов, пожарных отсеков, козырьков и т.п.) необходима для адекватной оценки аэродинамических давлений, их локальных экстремумов и распределения по поверхности здания / сооружения;

– в случае определения только интегральных аэродинамических нагрузок на несущие конструкции допускается разумное упрощение геометрических форм здания / сооружения.

5.2.4.2 При моделировании реальной застройки рассматривается близлежащая территория радиусом достаточным для учёта аэродинамического влияния окружающей застройки (как правило, для крупных объектов от 1 до 3

км). Окружающая застройка моделируется упрощённо согласно исходным данным – чертежам ситуационного плана. При построении геометрической модели застройки учитывается реальное расположение зданий/сооружений относительно целевого объекта, их высота и сечение в плане, а также локальный рельеф местности (перепады высот вблизи целевого объекта).

5.2.4.3 Объёмная геометрическая модель представляет собой объём воздуха в виде параллелепипеда или цилиндра, из которого «вычтены» объёмы, занимаемые целевыми зданиями и сооружениями, окружающей застройки, локальными повышениями уровня рельефа местности и др.

5.2.5 Пространственная дискретизация модели (расчётная сетка)

5.2.5.1 Наиболее эффективным в настоящее время является «метод конечных объёмов» (МКО) [10], не требующий столь детального моделирования пограничного слоя [11], как метод конечных элементов (МКЭ), и существенно более универсальный при описании сложных расчётных областей реальных зданий и сооружений, чем метод конечных разностей (МКР).

5.2.5.2 В созданной объёмной геометрической модели создается комбинированная сетка: неструктурированная сетка из тетраэдров в геометрически сложных областях и структурированная сетка из гексаэдров в геометрически простых областях.

Рекомендуемые размеры расчётных сеток для проведения основных аэродинамических расчётных исследований следующие:

- на поверхности целевого объекта и приземном воздушном слое (~4 м от земли) – 0.25-1 м;
- в ближней зоне целевого объекта (в радиусе 0.3-0.5 км) на поверхностях соседних зданий / сооружений и приземном воздушном слое достигают – 1.5-3 м;
- на достаточном удалении от целевого объекта размеры на поверхностях зданий / сооружений окружающей застройки – 6-10 м, а в приземном слое – 4-6 м.

5.2.5.3 Для корректного учета аэродинамических процессов, происходящих в пограничном слое поверхностей целевого объекта рекомендуется дискретизация пограничного слоя рядом тонких (в нормальном к поверхности направлении) элементов. В нестационарных расчетах (см. пп. 5.4.1) детальная дискретизация пограничного слоя рядом тонких элементов обязательна.

Параметры дискретизации пограничного слоя зависят от скорости потока ветра, размеров и формы целевого объекта.

Рекомендуется дискретизировать пограничный слой в нормальном к поверхностям направлении не менее, чем 10 элементами. Размер элементов в нормальном к поверхностям направлении (толщина) рекомендуется не менее 10 см. Размер элементов в других направлениях должен быть не больше, чем 20 толщин.

5.2.5.4 Перед проведением основных аэродинамических расчётов здания / сооружения с учётом окружающей застройки и локального рельефа местности необходимо провести серию верификационных и валидационных расчётных исследований (проверка сеточной сходимости) без учёта застройки и рельефа с целью выбора оптимальных параметров расчётной конечнообъемной сетки непосредственно на поверхности и вблизи исследуемого объекта [12]. Рекомендуемая начальная величина поверхностной сетки на целевом объекте не должна превышать характерные размеры фасадных конструкций (~1 м). Количество расчётных случаев (количество сгущений сетки) должно быть не менее 3.

5.2.5.5 С целью экономии вычислительных ресурсов для учёта влияния окружающей застройки, технологического оборудования, трубопроводов, лестниц и т.п. может использоваться технология их моделирования методом «погруженных границ» [28-29].

Технология применения метода «погруженных границ» заключается в следующем: создаются отдельные конечно-объемные модели твердотельных объектов, которые «погружаются» в основную расчетную сетку.

5.2.6 Параметры численных расчётов

Физическое время счёта для нестационарных расчётов должно быть достаточным для корректного определения максимального, минимального и среднего ветрового давлений, а также частот пульсаций. Физическое время счёта принимается достаточным, когда средняя составляющая и стандарт (дисперсия) давлений на поверхностях целевого объекта не изменяются во времени.

Шаг по времени выбирается таким образом, чтобы период колебаний аэродинамических нагрузок описывался минимум 10-20 точками (т.е. число Куранта

$$C_0 = \frac{V_{\max} \Delta t}{\Delta x_{\min}} < 3 \quad (5.2.1)$$

где Δx_{\min} – минимальный размер конечного объёма сетки по потоку; V_{\max} – максимальная скорость потока).

Применяются схема адвекции высокого разрешения и неявная схема интегрирования по времени второго порядка.

Критерием сходимости и окончания счёта для стационарной постановки является достижение заданного уровня максимальных невязок $10^{-3} - 10^{-5}$ и выход на асимптоту зависимостей аэродинамических сил от номера шага (условного времени).

Для задач в нестационарной постановке – выход на устойчивый режим течения, который отслеживался по временным зависимостям периодической природы аэродинамических сил и достижение заданного уровня максимальных невязок $10^{-3} - 10^{-5}$. При этом максимальное количество итераций на шаге принимается равным 5 – 10.

5.3 Схема расчётных исследований

а) Анализ ветровых режимов района строительства, локального рельефа местности площадки строительства, сложившейся застройки и конструктивно-

архитектурных особенностей исследуемого объекта. Формирование граничных и начальных условий для потока в расчётной области (см. пп. 5.2.2-5.2.3).

б) Разработка трёхмерных моделей ветровой аэродинамики исследуемого объекта без учёта окружающей застройки.

в) Валидация численной модели на различных расчётных сетках с разной степенью дискретизации (проверка сеточной сходимости, см. п. 5.2.5). Выбор основных параметров сетки на поверхности исследуемого объекта, на границах и внутри расчётной области для проведения основных многовариантных расчётных исследований. При наличии ранее проведённой валидации модели схожего объекта (близкие форма и размеры зданий, незначительная разница в граничных условиях) возможно использование результатов этой валидации для нового объекта.

г) Разработка трёхмерных моделей ветровой аэродинамики исследуемого объекта с учётом окружающей застройки и локального рельефа местности.

д) Проведение стационарных аэродинамических расчётов двух моделей (с учетом и без учёта окружающей застройки и рельефа) для репрезентативных (в аэродинамическом смысле) направлений ветра (как правило, не менее 24 направлений). Между теми направлениями ветра, в которых наблюдаются наиболее высокие ветровые нагрузки на объект, с целью повышения точности рекомендуется рассмотрение дополнительных расчётных направлений ветра.

е) По результатам многовариантных аэродинамических расчётов в стационарной постановке определяются:

- ветровые нагрузки на несущие конструкции (см. пп. 4.5.1);
- ветровые нагрузки на ограждающие (фасадные) конструкции (см. пп. 4.5.2);
- ветровые воздействия в пешеходных зонах (оценка пешеходной комфортности) (см. пп. 4.5.3);

– возможность возникновения аэроупругой неустойчивости (типа галопирования, галопирования в спутной струе и дивергенции) зданий, сооружений и их отдельных конструктивных элементов (см. пп. 4.5.4);

– уровень комфортности пребывания на верхних этажах здания посетителей, сотрудников и обслуживающего персонала при действии ветровой нагрузки (см. пп. 4.5.5).

ж) В результате анализа полученных результатов многовариантных аэродинамических расчётов в стационарной постановке определяются наиболее опасные направления ветра с точки зрения реализации максимальных нагрузок на несущие и фасадные конструкции; усиления скоростей ветра в пешеходных зонах, не удовлетворяющих критериям пешеходной комфортности; ускорений перекрытий здания/сооружения больше 0.08 м/с^2 ; а также возможности возникновения аэроупругих колебаний в результате ветрового воздействия [2, 19].

к) Для выбранных направлений ветра выполняется расчёт в нестационарной постановке. При обнаружении существенных отличий в средних, максимальных или минимальных значениях давлений, выявлении значительных нестационарных эффектов может оказаться необходимым выполнить нестационарные расчёты для дополнительных расчётных направлений ветра.

л) По результатам выполненных аэродинамических расчётов в нестационарной постановке определяются:

– уточнённые значения пульсационной составляющей критериальных параметров (расчётных значений давления и скорости ветра, суммарных нагрузок на несущие конструкции), кинетической энергии турбулентности;

– коэффициенты обеспеченности (см. пп. 5.4);

– частотные характеристики ветрового воздействия, спектры пульсаций давления в характерных точках поверхностей объекта;

- уточнённые ветровые воздействия в пешеходных зонах (оценка пешеходной комфортности);
- возможность возникновения аэроупругой (типа вихревой резонанс и флаттер) неустойчивости зданий, сооружений и их отдельных конструктивных элементов [19];
- уровень динамической комфортности пребывания на верхних этажах здания для посетителей, сотрудников и обслуживающего персонала при действии ветровой нагрузки (пп. 11.4 СП 20.13330).

5.4 Расчётная оценка средней и пульсационной составляющей ветровых нагрузок

5.4.1 Нестационарный аэродинамический расчёт

В результате расчёт в нестационарной постановке аэродинамического непосредственно определяют значения ветровых давлений и кинетической энергии турбулентности на поверхности зданий и сооружений для всех временных шагов решения.

При анализе результатов нестационарного расчёта необходимо «отбросить» таковые для начального периода физического времени (поток воздуха должен минимум один раз пройти всю расчетную область), т.к. эти результаты подвержены значительным вычислительным погрешностям.

Величины максимального (P_{\max}), минимального (P_{\min}) и среднего ветрового (P) давления в каждой точке поверхности объекта определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} P_{\max} &= \max_{i \in [m, n]} (p_i) \\ P_{\min} &= \min_{i \in [m, n]} (p_i) \\ P &= \frac{1}{n - m + 1} \sum_{i=m}^n p_i \end{aligned} \quad (5.4.1)$$

где p_i – давление на i -ом временном шаге, n – количество временных шагов, m – шаг, с которого начинается обработка результатов.

Пульсационные составляющие ветровой нагрузки определяются по следующей формуле:

$$\begin{aligned} P_{puls,+} &= P_{\max} - P \\ P_{puls,-} &= P_{\min} - P \end{aligned} \quad (5.4.2)$$

Для уточнения результатов стационарных расчётов необходимо также вычислить σ_p – среднеквадратическое отклонение (стандарт) давлений по следующей формуле:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{n-m} \sum_{i=m}^n (p_i - P)^2} \quad (5.4.3)$$

Основной характеристикой диапазона разброса давлений на поверхности зданий и сооружений служат коэффициенты обеспеченности. Их величины определяются по результатам нестационарных расчётов по соотношениям [14]:

$$\begin{aligned} \theta_{\max} &= (P_{\max} - P) / \sigma_p \\ \theta_{\min} &= (P - P_{\min}) / \sigma_p \end{aligned} \quad (5.4.4)$$

где P_{\max} , P_{\min} , P – вычисленные значения минимумов, максимумов и среднего давлений в точке поверхности (формулы 5.4.1); σ_p – среднеквадратическое отклонение (стандарт) давлений (формула 5.4.3).

Суммарные нагрузки на поверхности (компоненты сбора аэродинамических нагрузок) по результатам нестационарных расчетов определяются с помощью численного интегрирования по соответствующим поверхностям для всех рассчитанных моментов времени.

Спектральные характеристики ветровых нагрузок определяются с помощью дискретных преобразований Фурье над временным рядом ветровых нагрузок.

5.4.2 Стационарный аэродинамический расчёт

Ввиду высокой ресурсоёмкости вариантных нестационарных расчётов и для минимизации их объёма применяется инженерная методика оценки максимальных и минимальных значений ветрового давления (P_{\max} и P_{\min}) по результатам стационарных расчётов с учётом энергии турбулентных пульсаций TKE и осредненных коэффициентов обеспеченности θ_{\max} и θ_{\min} .

При этом необходимо предварительно сопоставить величины P и TKE в стационарном и нестационарном расчетах. По опыту расчётов реальных конструкций средние давления отличаются в стационарном и нестационарном расчетах незначительно. Кинетическая энергия пульсаций в стационарных расчетах нередко занижается, что можно компенсировать соответствующим увеличением коэффициентов обеспеченности [14, 18].

Основные расчётные соотношения методики [12]:

$$\begin{aligned}
 I &= (\rho \cdot TKE / |P| / 3)^{1/2}; \\
 \sigma_p &= (I^2 + 2I) \cdot |P|; \\
 P_{\max} &= P + \sigma_p \cdot \theta_{\max}; \\
 P_{\min} &= P - \sigma_p \cdot \theta_{\min}; \\
 P_{puls} &= (P_{\max} - P_{\min}) \cdot \nu / 2,
 \end{aligned}
 \tag{5.4.5}$$

где σ_p – среднеквадратичное отклонение (стандарт) давлений P ; I – интенсивность турбулентности (стандарт пульсаций скорости); ν – коэффициент корреляции давлений на поверхностях [17] (для предварительных оценок может использоваться значение по СП 20.13330).

Для предварительных расчётов допустимо принять $\theta_{\max} = 3$ и $\theta_{\min} = 6$ (по рекомендациям [32]). Уточнение коэффициентов обеспеченности выполняется по результатам нестационарных расчётов (формулы 5.4.4).

Суммарные нагрузки на поверхности (компоненты сбора аэродинамических нагрузок) по результатам стационарных расчетов определяются с помощью численного интегрирования по соответствующим поверхностям.

5.5 Расчётная оценка пиковых ветровых давлений на ограждающие конструкции

В отличие от определения расчётных аэродинамических нагрузок, для которых, как правило, вполне достаточно ограничиться 4-8 направлениями ветра,

для расчёта локальных минимумов и максимумов (пиковых давлений на ограждающие конструкции) необходимо проводить расчёт для репрезентативного набора направлений ветра, поскольку априори неизвестно, при каком из них будут реализовываться экстремальные значения давлений.

Для оценки пиковых значений давления необходимо по одной из методик пп. 5.4 определить максимальные и минимальные расчётные давления (P_{\max} и P_{\min}) в каждой точке поверхности здания для всех направлений ветра.

Для построения картин распределения пиковых давлений на поверхностях здания следует в каждой точке выбрать максимальное значение P_{\max} и минимальное значение P_{\min} среди всех расчётных направлений ветра [18]. Полученные картины пиковых ветровых давлений называют верхней огибающей максимальных ветровых давлений и нижней огибающей минимальных ветровых давлений.

Дополнительной информацией о пиковых значениях ветровых давлений могут служить картины распределения углов направлений ветра, при которых реализуются максимальные значения P_{\max} и минимальные значения P_{\min} среди всех расчётных направлений ветра.

Изложенная выше методика предполагает, что конструктивные элементы ограждения и узлы их крепления к зданию (сооружению) являются достаточно жёсткими и в них не возникает заметных динамических усилий и перемещений. В случае, если собственные частоты системы «элементы ограждения – их несущие конструкции – элементы их крепления» менее их предельных значений, определяемых в соответствии с указаниями 11.1.10 СП 20.13330.

5.6 Расчётная оценка пешеходной комфортности

Для оценки пешеходной комфортности требуются данные метеонаблюдений: роза ветров и повторяемость распределения скоростей ветра на территории строительства. Из аэродинамических расчетов определяется максимальная скорость V_{\max} (с учетом пульсаций) в точках рассматриваемой

зоны на расчетной высоте 1.5 м. для всех направлений ветра [15]. В результате нестационарных расчетов максимальная скорость V_{\max} определяется напрямую. По результатам стационарных расчетов определяются средняя скорость V_m , а максимальная может быть вычислена по формуле:

$$V_{\max} = V_m + \theta \cdot I \quad (5.6.1)$$

где I – интенсивность турбулентности (стандарт пульсаций скорости); θ – коэффициент обеспеченности по заданию на расчёт (обычно в диапазоне от 1 до 3).

Основная идея критериев пешеходной комфортности, состоит в вычислении времени наблюдения определенных скоростей ветра. Оценка проводится при помощи розы ветров, в которой для каждого направления ветра указаны промежутки скоростей и соответствующее количество часов в год наблюдения данного промежутка. Чтобы не выполнять большое количество расчетов для одного направления ветра (для каждого промежутка в отдельности), можно расчетную скорость (которая использовалась в расчетах нагрузок на несущие и ограждающие конструкции) масштабировать до необходимой, при помощи следующего коэффициента:

$$k_i = \frac{V_i}{V_{10}} \quad (5.6.2)$$

где V_i – среднеарифметическое промежутков скоростей в таблице метеоданных на высоте 10 м («розе ветров») для каждого промежутка; V_{10} – рассчитанная средняя скорость входного потока на отметке 10 м.

Тогда отмасштабированные для разных интервалов значения максимальной скорости ветра можно вычислить по следующей формуле:

$$V_{\max,i} = k_i \cdot V_{\max} \quad (5.6.3)$$

Далее для каждой точки рассматриваемой зоны вычислялось «время дискомфорта l -го уровня» K_l ($l=1,2,3$ согласно [3]) следующим образом: если расчетная максимальная скорость $V_{\max,i}$ превышает критическую скорость $V_{cr,l}$ для l -го уровня комфортности, тогда для $V_{\max,i}$ по данным метеонаблюдений, то берется частота ее повторяемости для угла атаки, при котором реализуется эта скорость. Таким образом в каждой точке для всех направлений ветра вычисляется «время дискомфорта l -го уровня» (частота повторений скоростей, превышающих критическую):

$$K_l = \sum_{i,j} \delta \cdot T_{ij} \quad (5.6.2)$$

где δ – признак (0 или 1) превышения локальной скоростью ветра в точке $V_{\max,i}$ критического значения $V_{cr,l}$ для данного уровня комфорта l ; T_{ij} – продолжительность (по метеоданным, часов в год) ветрового воздействия направления j и скорости $V_{\max,i}$.

Зоны, где $K_l > K_{cr,l}$ ($l=1,2,3$), являются зонами ветрового «дискомфорта».

5.7 Программная реализация численной методики определения ветровых воздействий

Рассмотренные выше математические и численные подходы моделирования задач гидрогазодинамики реализованы в исследовательских (в т.ч., с открытым исходным кодом) и коммерческих программных продуктах (программных комплексах (ПК)).

Функционально ПК состоит из трёх относительно независимых модулей (препроцессора, «решателя» и постпроцессора):

- задачей препроцессора является импортирование расчётной сетки, задание типа решаемой проблемы, назначение среды моделирования и расстановка начальных и граничных условий;

- «решатель» обладает рядом особенностей, позволяющих гибко и эффективно организовывать процесс расчёта; в некоторых ПК имеется возможность проведения параллельных вычислений;

- постпроцессор поддерживает необходимые функции по анализу, обработке и визуализации информации, возможно создание графиков, картин, эшюр и анимаций.

С точки зрения проведения большого объёма многовариантных расчётов (в частности, при различных направлениях ветра) важным достоинством некоторых ПК является наличие встроенного языка программирования, поддерживающего параметры, массивы, запрос информации из баз данных, ввод-вывод в текстовые файлы, циклы, условные переходы, встроенные математические функции, макросы, шифрование и др., возможность создавать собственные типовые модели – «примитивы», включать свои алгоритмы.

Примеры использования численной методики определения ветрового нагружения зданий, сооружений и комплексов

6.1 Расчётное определение ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции и параметров пешеходной комфортности многофункционального жилого комплекса

6.1.1 Общие сведения

В данном разделе приведен пример расчётного исследования многофункционального жилого комплекса (далее МЖК) на ветровое воздействие, цель которого определение ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции, а также оценка пешеходной комфортности. Для решения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

- проведён анализ ветровых режимов района строительства, сложившейся застройки и конструктивно-архитектурных особенностей многоэтажных зданий МЖК.

- разработаны и верифицированы расчётные трёхмерные CFD-модели, включающие рассматриваемый МЖК и существующую окружающую застройку в радиусе 1.1 км и высотой 0.15 км.

- определены средние и пульсационные составляющие аэродинамических нагрузок на несущие конструкции при 24-х направлениях ветра (через 15°) в трёхмерной постановке для МЖК в окружающей застройке (см. пп. 5.4).

- определены пиковые (минимальные и максимальные) давления на фасадные конструкции согласно пп.5.5 для 24-х направлениях ветра (через 15°) в трёхмерной постановке для МЖК в окружающей застройке: расчётные значения "огибающих" максимального и минимального значений ветрового давления на фасадные конструкции; огибающие вычисленных поэтажно максимальных и минимальных значений ветрового давления на фасадные конструкции; картины верхней огибающей максимальных значений ветрового давления, нижней огибающей минимальных значений ветрового давления и соответствующих углов атаки ветра, при которых реализуются эти огибающие.

- определены ветровые воздействия в пешеходных зонах согласно п.5.6 на высоте 1.5 м и 6.9 м (оценка пешеходной комфортности): расчётные поля коэффициентов усиления скоростей ветра; уровни пешеходной комфортности по 3-м нормативно регламентированным критериям.

.1.1.1 Краткая характеристика МЖК

Земельный участок под строительство Многофункционального жилого комплекса (МЖК) располагается на территории г. Москва.

МЖК состоит из двух групп жилых домов:

- пяти одиннадцатизэтажных односекционных корпусов (башни) регулярно и со смещением;
- трёх двухсекционных корпусов (пластины) размещённых по южной стороне участка вдоль железной дороги и образующих шумозащитный экран для дворовой части МЖК.

Жилые корпуса расположены на двухэтажной подземной части. Входы в жилые секции расположены на уровне земли без ступеней и пандусов.

Максимальная высота МЖК не превышает 100,00 м от отметки ± 0.000 . В соответствии с [1] является уникальным объектом.



Рисунок 6.1.1 – Фасад дворовой в осях 1-58

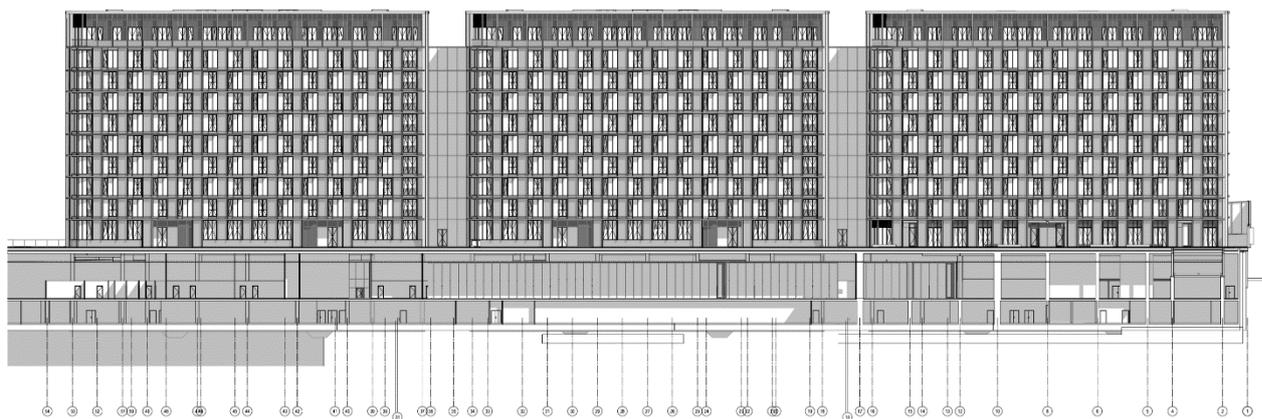


Рисунок 6.1.2 – Фасад дворовой в осях 54-1

6.1.1.2 Площадка строительства и окружающая застройка

Участок, предназначенный для МЖК, располагается на территории г. Москва.

Территория участка имеет трапециевидную в плане форму, приближенную к прямоугольной, ориентировочными размерами 170x240 м. Площадь земельного участка составляет 4.0185 га. Рельеф участка со значительным уклоном к юго-востоку. Максимальный перепад высот составляет более 14 м.

Верхняя отметка корпусов 1-5 проектируемого многофункционального жилого комплекса достигает 43.5 м, верхняя отметка корпусов 6-8 достигает 39.9 м. С северо-восточной стороны от целевого объекта на расстоянии ~0.2 км располагаются здания существующего жилого комплекса, высота которых достигает 36 м. При таком взаимном расположении зданий рассматриваемый МЖК будет находиться в зоне «затенения» при северо-восточном направлении ветра, что приведёт к снижению средних аэродинамических нагрузок. В радиусе ~1 км от целевого объекта расположены здания, высота которых не превышает 75 м. На территории МЖК помимо исследуемых корпусов 1-8 присутствуют небольшие здания и сооружения, стилобатная часть и сложный рельеф. В аэродинамических расчетах учитывались эти особенности.

За пределами исходной схемы планировочной организации земельного участка для близлежащей территории, окружающие здания моделировались

упрощённо по фотографиям и информации из Интернета. Для справки приводятся характерные виды (рисунок 6.1.3).



Рисунок 6.1.3 – Слева -схема планировочной организации земельного участка; справа –эскиз МЖК

6.1.1.3 Ветровые режимы зоны строительства

Для оценки ветровых нагрузок необходимо применение метеорологии, микрометеорологии и климатологии. Метеорология даёт описание и объяснение основных характерных особенностей атмосферных течений. Микрометеорология описывает структуры атмосферных течений вблизи поверхности земли.

В Москве, как и в других больших городах мира, естественно-погодные условия в значительной степени подвержены воздействиям самого города, его сложного хозяйства. Внутри города наблюдаются микроклиматические различия, обусловленные территориальной застройкой, размещением промышленных установок, характером подстилающей поверхности, рельефом.

В целом территория Москвы равнинная. Основная часть города расположена на высоте 30-35 м над уровнем Москвы-реки (150 м над уровнем моря). Самая высокая часть Москвы приурочена к Теплостанской возвышенности (около 250 м над уровнем моря), расположенной на Юге и Юго-Западе города. Самые низкие части города, восточная и юго-восточная относятся к окраине Мещерской равнины.

В исследовании использовались данные о ветровых режимах, основанные на статистических данных и используемые для прогнозирования максимальных

значений, учитывались замеры ветра у поверхности, проведённые обсерваторией Михельсона (в период с 1966 по 1998 гг.).

В расчетах ветровых нагрузок на МЖК принят первый ветровой район (согласно СП 20.13330), тип местности В – «городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м».

Значение нормативного давления равно 230 Па, что соответствует скорости ветра на высоте 10 м над землей 19.2 м/с. Расчётное ветровое давление с учётом коэффициента надёжности по нагрузке 1.4 и с учётом коэффициента для типа местности $k(z_e=10\text{ м})=0.65$, равняется 209.3 Па, что соответствует скорости ветра на высоте 10 м над землёй 18.3 м/с.

6.1.2 Разработка расчётной модели

6.1.2.1 Геометрическая модель комплекса жилых зданий в окружающей застройке

Практическая подготовка модели начинается с создания геометрической объёмной модели сооружений и окружающей застройки (в радиусе 1.1 км). Геометрия строений жилого комплекса выполнена согласно исходным данным. При создании трёхмерной (3D) геометрической модели комплекса жилых зданий в программном комплексе максимально учитывалась реальная геометрия фасадов (парапеты, оконные проемы и т.п.), что немаловажно для адекватной оценки аэродинамических давлений, их локальных экстремумов и распределения по поверхности здания. Геометрия окружающей застройки создавалась на основе предоставленных исходных данных (ситуационного плана) и общедоступных веб-карт (рис. 6.1.4).

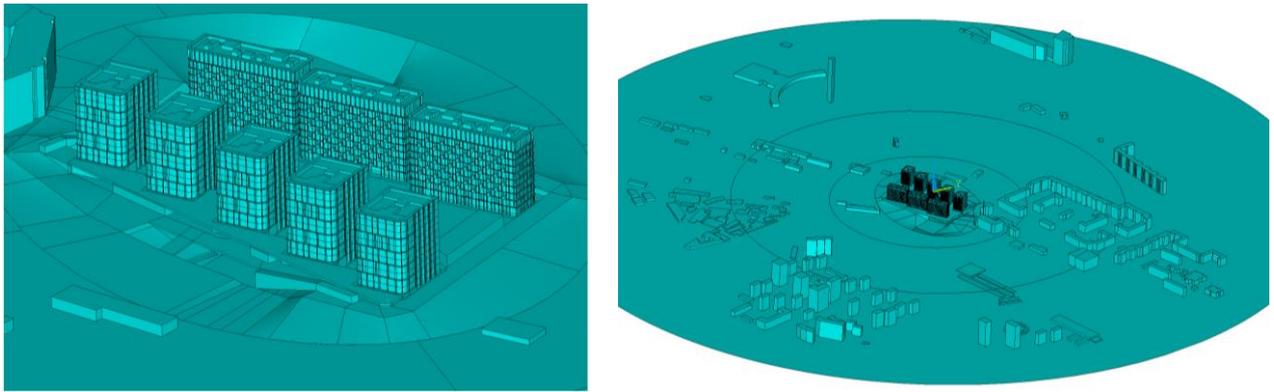


Рисунок 6.1.4 - Геометрическая модель комплекса зданий с учётом локального рельефа местности и окружающей застройки. Слева - вид с ЮВ; справа – изометрия

6.1.2.2 Расчётная модель и сетка КО

Расчетная модель формируется следующим образом. После создания в программном комплексе объемной геометрической модели Многофункционального комплекса, она "вычитается" из модели воздушного пространства (в форме цилиндра высотой 0.15 км и радиусом 1.1 км – для модели МЖК в окружающей застройке). Далее полученная расчётная область разбивается на конечные объёмы.

В ближайшей зоне для сгущения сетки около каждого из строений комплекса был создан прямоугольный объём с отступом от габаритов соответствующего строения 3 м. Далее вокруг комплекса был создан эллипс с полуосями 200 м и 140 м и высотой 150 м, затем были созданы цилиндры радиусом 275 м, 550 м и 1100 м и высотой 150 м.

Для проведения основных аэродинамических расчётных исследований МЖК с учётом окружающей застройки были приняты следующие размеры элементов сетки:

- на поверхности строений многофункционального комплекса и в ближайшем прямоугольном объёме от целевого объекта с отступом от габаритов соответствующего строения 3 м – 0.5 м;

- застройке в пределах площадки строительства – вплоть до 0.5 м, в пределах эллипса – 1.5 м;

– в цилиндрической объёме радиусом 275 м и высотой 150 м на поверхности земли – 1.5 м, в объёме – 2.5;

– в цилиндрическом объёме радиусом 550 м на поверхности застройки и земли – не более 3 м, в объёме – до 9 м;

– в цилиндрическом объёме радиусом 1100 м на поверхности застройки и земли – до 9 м, в объёме – до 18 м.

Общий размер основных расчётных конечнообъемных (КО) моделей составил ~18.0 млн. КО.

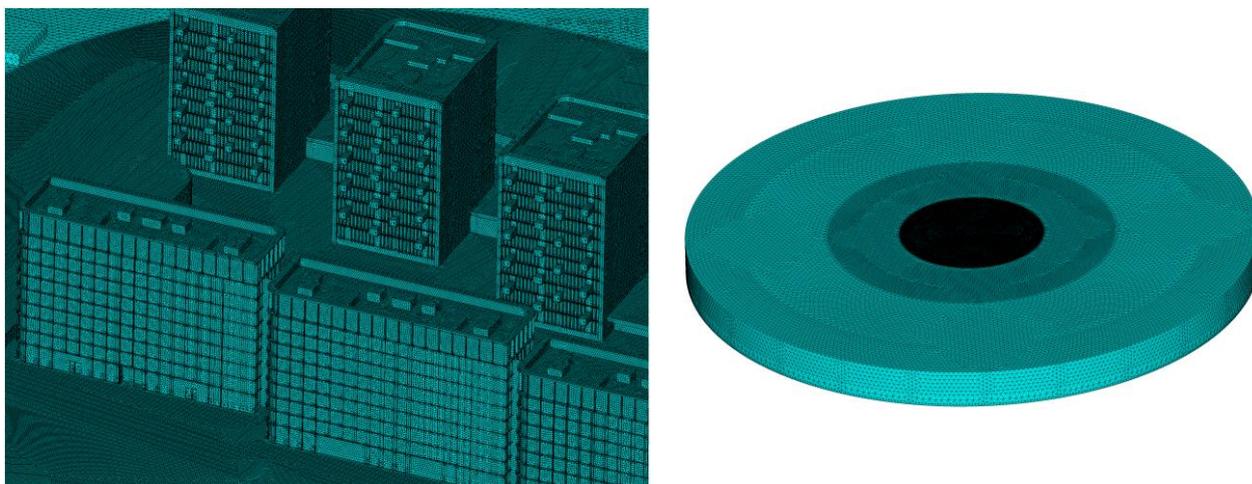


Рисунок 6.1.5 - Слева – сетка на поверхности МЖК и на близлежащих зданиях, справа – КО-сетка расчётной области радиусом 1.1 км (18 041 041 узлов / конечных объёмов).

6.1.2.3 Граничные и начальные условия

Области расчёта присвоены следующие физические параметры: тип среды – несжимаемый воздух при температуре (25°C) и давление 1 атм.

Граничные условия на «входе» (INLET) соответствуют 1-му ветровому району, типу местности В «городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м» в соответствии с данными СП 20.13330. Профили давлений и пульсаций были пересчитаны для ввода в программный комплекс в аналогичные зависимости от вертикальной координаты для скорости, кинетической энергии турбулентности и энергии диссипации, соответствующие расчетным значениям нагрузок с учётом

коэффициента надёжности по нагрузке 1.4. Масштаб турбулентности принят равным 300 м в соответствии с рекомендациями Eurocode.

На «выходе» (OUTLET) и на верхней границе области потока назначены «мягкие» граничные условия с нулевыми дополнительными давлениями и такими же параметрами турбулентности, как и на «входе».

На «земле» и на здании задано условие «стенки с прилипанием», ($u = v = w = 0$ м/с), исключающее проникновение вещества через поверхность.

В качестве начальных условий во всем области задавались нулевые скорости ($u = v = w = 0$ м/с) и нулевые дополнительные давления.

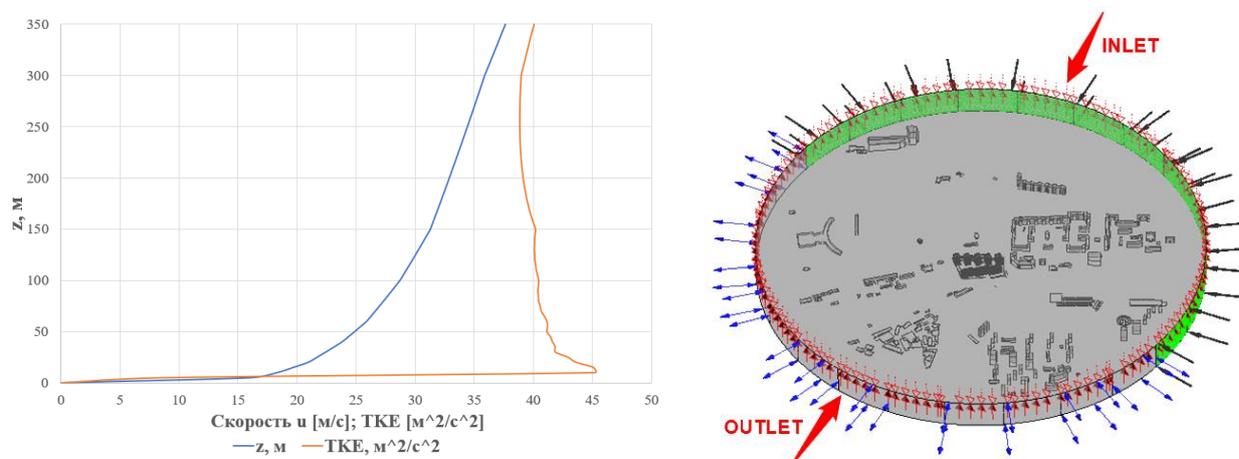


Рисунок 6.1.6 - Слева – Профили кинетической энергии турбулентности TKE (синяя линия), m^2/c^2 , и горизонтальной составляющей скорости ветра u (красная линия), м/с, для первого ветрового района, тип местности В («пригород»), справа – расчётная область с обозначенными граничными условиями для угла атаки ветра 0° .

6.1.2.4 Параметры расчёта

Наиболее опасные направления ветра определялись на основе выполненных трёхмерных расчётных исследований в стационарной постановке с использованием модели турбулентности RANS SST при 24-х направлениях ветра (углы атаки ветра от 0° до 345° с шагом 15°).

Критерием окончания счёта назначено максимальное количество итераций – 100 или достижение максимальных невязок по давлению и по всем компонентам скорости $3 \cdot 10^{-4}$.

Минимальные и максимальные значения локальных давлений оценивались с использованием вычисленных средних значений давления, величины кинетической энергии турбулентности из стационарного расчёта. Коэффициенты обеспеченности θ_{\min} и θ_{\max} для определения пиковых значений и пульсационной составляющей давления по опыту проведенных ранее расчётов приняты согласно методике (п. 5.4).

6.1.3 Результаты аэродинамических расчётов

Ниже представлены полученные результаты многовариантных расчётных исследований. Многовариантные расчётные исследования проводились с учётом рельефа и окружающей застройки – МЖК в «окружающей застройке».

Ветровые нагрузки на несущие конструкции:

- средние значения суммарных расчётных ветровых нагрузок на несущие конструкции МЖК (примеры см. рисунок 6.1.7) в заданных фиксированных осях (F_x , F_y (тс)), векторная сумма нагрузки (F_R) и крутящий момент относительно начала координат (M_z (тс·м)) для 24-х направлений (шаг по углу 15°).

- средняя (f (Н/м)), пульсационная (амплитуда или полуразмах, f_{puls} (Н/м)) составляющие погонной силы и коэффициент «пульсаций» ($k_{puls} = f_{puls} / |f|$) для соответствующей компоненты (поверхность сбора аэродинамической нагрузки в уровне перекрытия) каждого этажа ЖК.

Ветровые нагрузки на фасадные конструкции:

- огибающие максимального и минимального значений давления на фасады ЖК для всех направлений ветра (примеры см. рисунок 6.1.8-6.1.9);

- огибающие вычисленных поэтажно максимальных и минимальных значений ветрового давления на фасадные конструкции; картины верхней огибающей максимальных значений ветрового давления, нижней огибающей минимальных значений ветрового давления и соответствующих углов атаки ветра, при которых реализуются эти огибающие, представлены в графическом виде (пример см. 6.1.10);

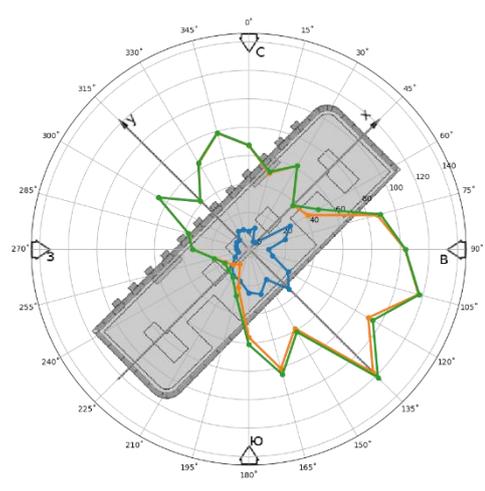
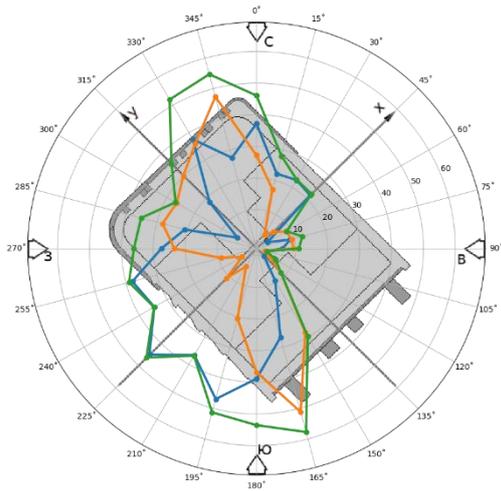


Рисунок 6.1.7 – Средние суммарные ветровые нагрузки на корпуса ЖК в зависимости от направления ветра, т.е. F_R – равнодействующая сила, F_X , F_Y – проекции F_R на оси координат (значения приведены по модулю). Слева – корпус 1; справа – корпус 6.

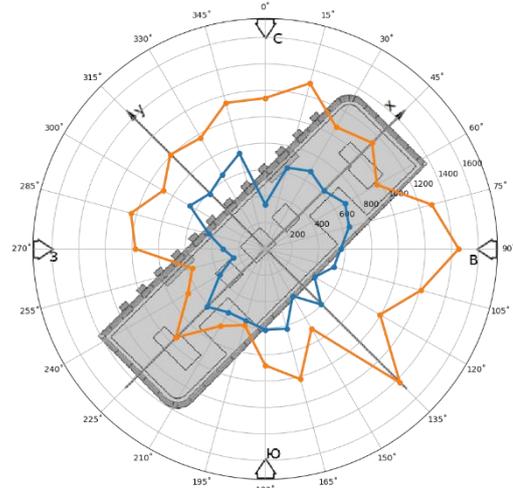
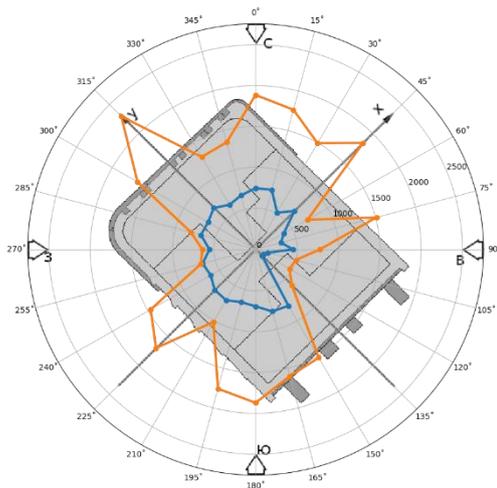


Рисунок 6.1.8 – Огибающие максимального (синяя линия) и минимального (зеленая линия) значений давления на фасады корпуса ЖК в зависимости от направления ветра, P_a (значения приведены по модулю). Слева – корпус 1; справа – корпус 6.

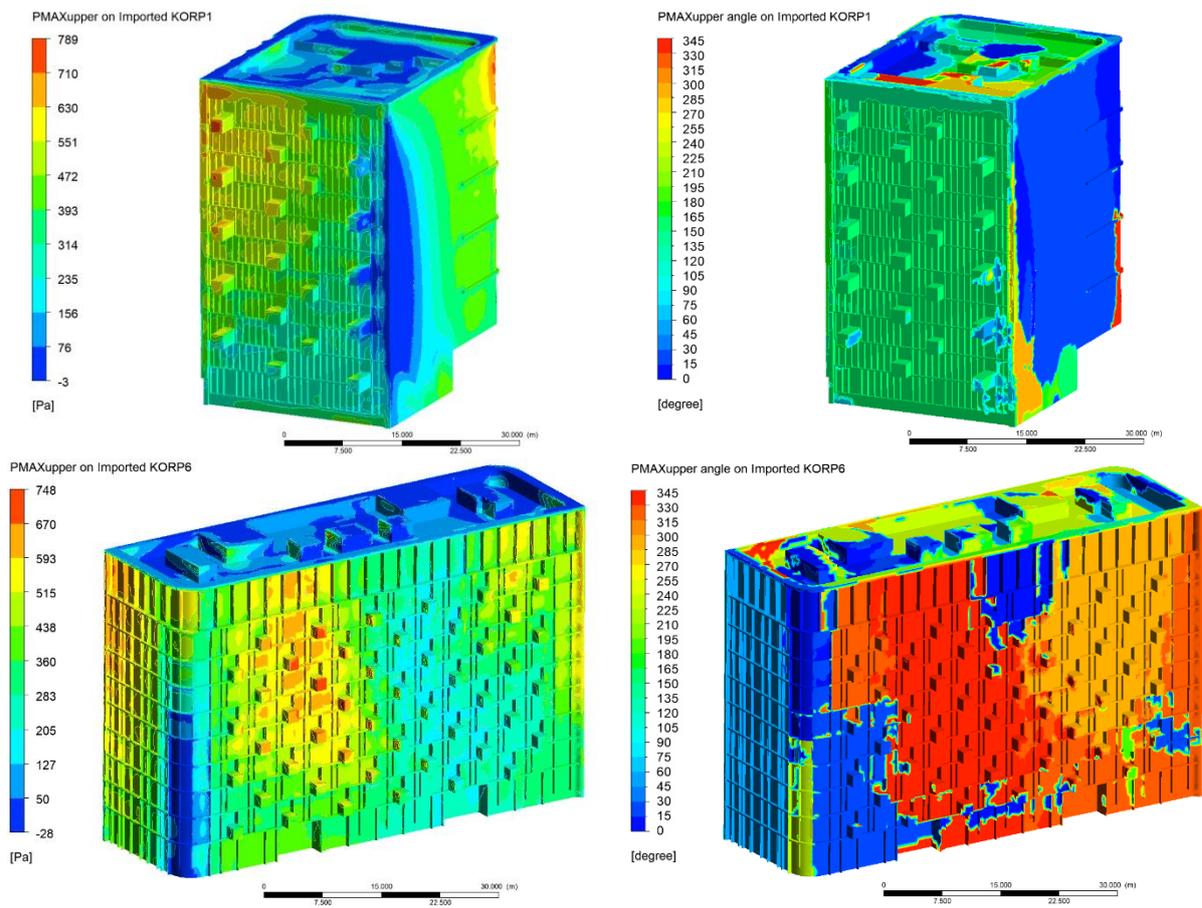


Рисунок 6.1.9 – Сверху – корпус 1 МЖК, снизу – корпус 6 МЖК. Слева – верхняя огибающая максимальных значений ветрового давления (Па) на фасадные конструкции ЖК. Справа – Углы атаки ветра ($^{\circ}$), при которых реализуется верхняя огибающая максимальных значений ветрового давления на фасадные конструкции ЖК.

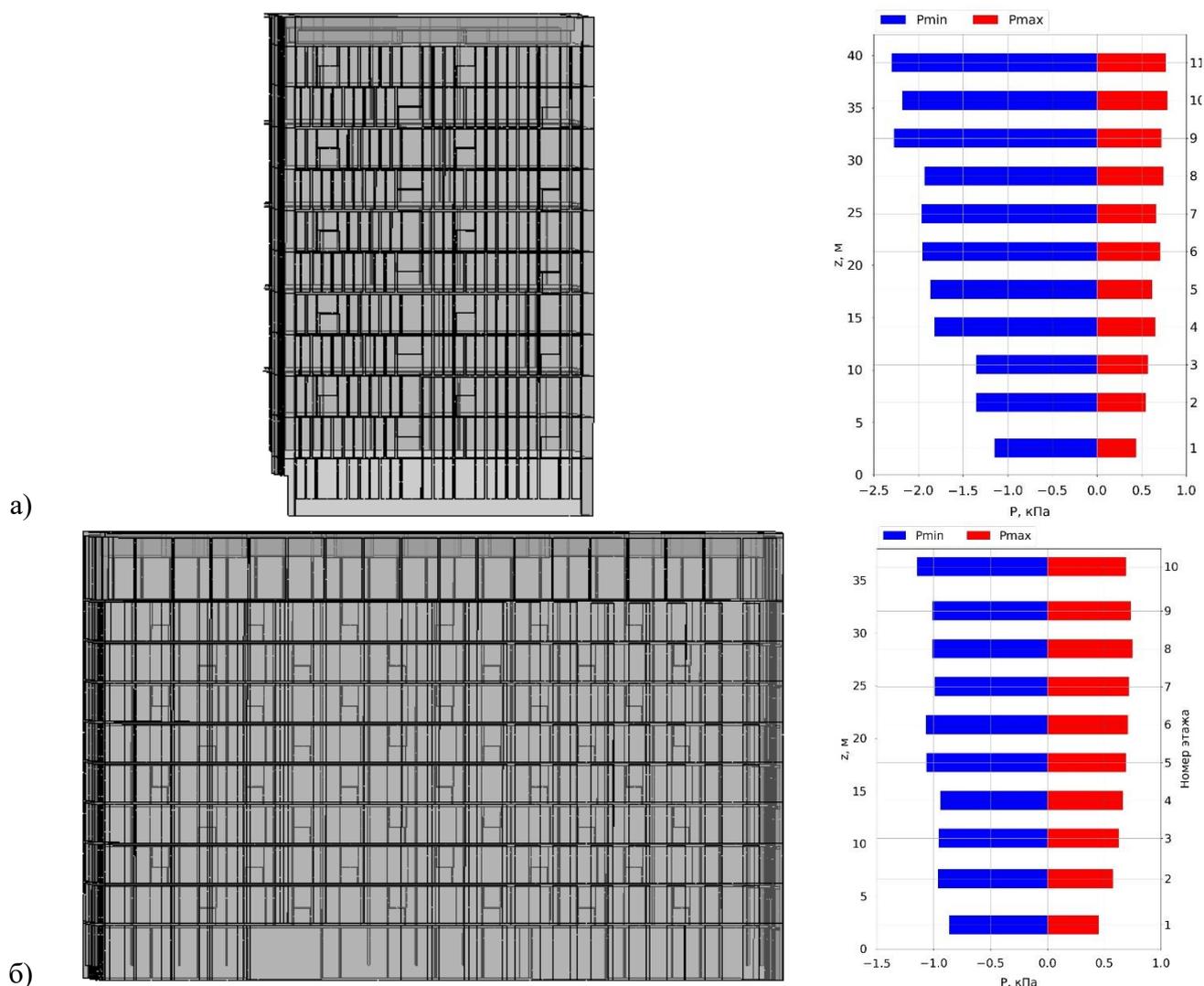


Рисунок 6.1.10 - Поэтажные огибающие минимального (P_{\min}) и максимального (P_{\max}) значений давления (Па) на фасадные конструкции МЖК с учётом всех направлений ветра.
 а) Корпус 1; б) Корпус 6

Расчётная оценка пешеходной комфортности:

- распределение скоростей ветра в порывах для пешеходных зон МЖК при 24-ти направлениях ветра (через 15°) в трёхмерной постановке с учётом рельефа местности и основных близкорасположенных зданий (пример см. рисунок 6.1.11);
- расчётные оценки уровней пешеходной комфортности по трем нормативно регламентированным критериям (примеры см. рисунки 6.1.12-6.1.14).

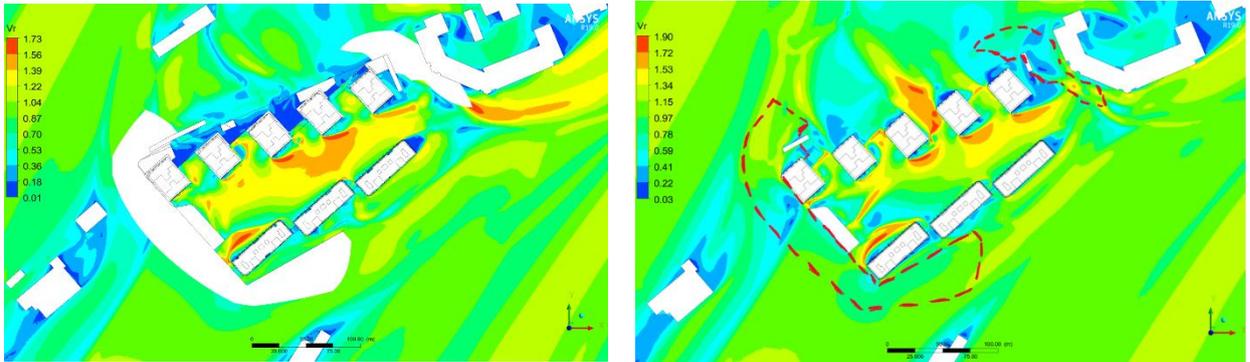


Рисунок 6.6.11 – МЖК в окружающей застройке. Коэффициенты усиления средней скорости ветра в пешеходной зоне. Угол атаки ветра 210°

Слева - отметка уровня 1.5 м; справа – отметка уровня 6.9 м
(красным пунктиром отмечены области возвышений рельефа)

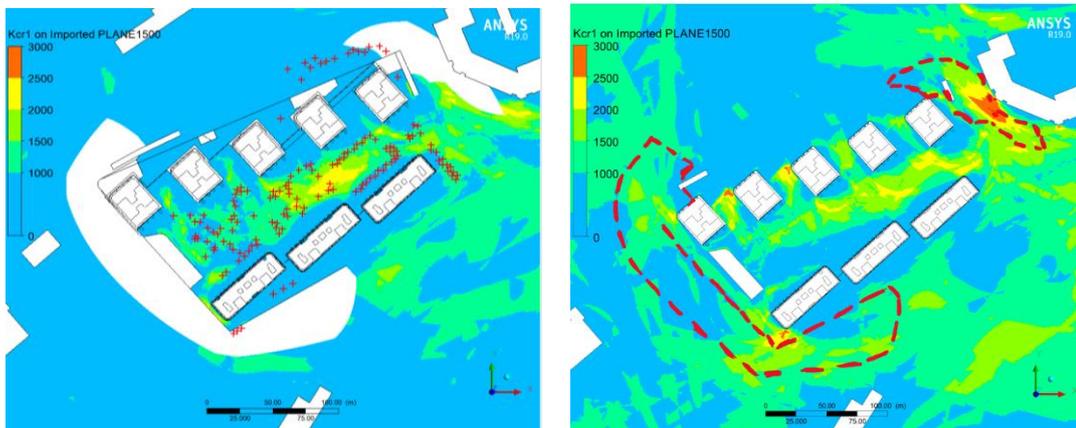


Рисунок 6.1.12 – 1-й уровень пешеходной комфортности – превышение $V_{cr1}=6 \text{ м/с}$ не чаще $K_{cr1} = 1000 \text{ часов}$ в год в пешеходной зоне

Слева - отметка уровня 1.5 м; справа – отметка уровня 6.9 м
(красным пунктиром отмечены области возвышений рельефа, красными крестиками отмечено расположение деревьев согласно схеме озеленения)

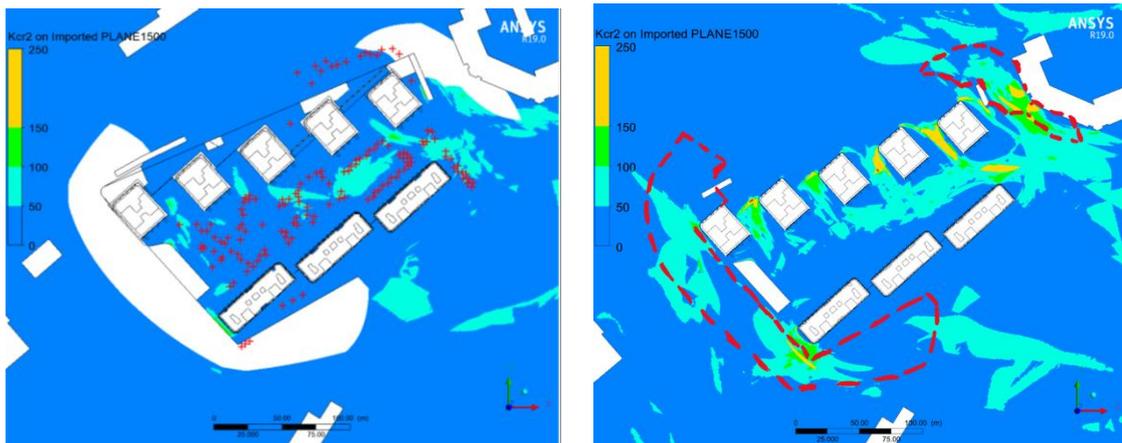


Рисунок 6.1.13 – 2-й уровень пешеходной комфортности – превышение $V_{cr2}=12 \text{ м/с}$ не чаще $K_{cr2} = 50 \text{ часов}$ в год в пешеходной зоне

Слева - отметка уровня 1.5 м; справа – отметка уровня 6.9 м
(красным пунктиром отмечены области возвышений рельефа, красными крестиками отмечено расположение деревьев согласно схеме озеленения)

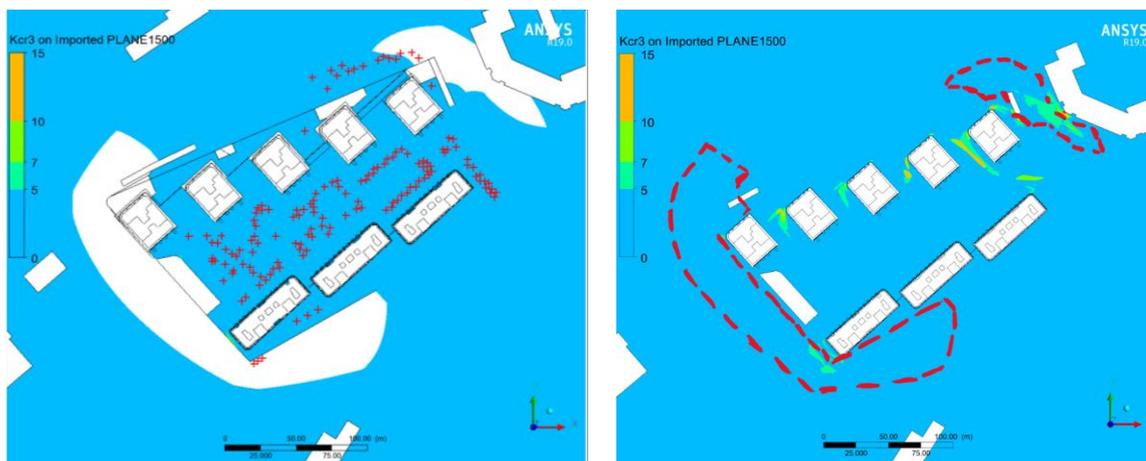


Рисунок 6.1.14 – 3-й уровень пешеходной комфортности – превышение $V_{cr3}=20$ м/с не чаще $K_{cr3} = 5$ часов в год в пешеходной зоне
 Слева - отметка уровня 1.5 м; справа – отметка уровня 6.9 м
 (красным пунктиром отмечены области возвышений рельефа, красными крестиками отмечено расположение деревьев согласно схеме озеленения)

6.1.4 Анализ результатов и выводы.

Для МЖК были определены расчётные средние и пульсационные составляющие ветровых нагрузок (с учётом всех направлений ветра) на несущие конструкции МЖК. С точки зрения реализации максимальной равнодействующей аэродинамической силы (F_R) были определены наиболее характерные и опасные углы атаки ветра: для корпуса 1 МЖК – 195° , 345° ; для корпуса 2 МЖК – 180° , 345° ; для корпуса 3 МЖК – 345° , 195° ; для корпуса 4 МЖК – 210° , 300° ; для корпуса 5 МЖК – 90° , 135° ; для корпуса 6 МЖК – 135° , 345° ; для корпуса 7 МЖК – 165° , 300° ; для корпуса 8 МЖК – 180° , 135° .

Было выявлено, что здания МЖК оказывают друг на друга значительное влияние с точки зрения аэродинамики. В тех случаях, когда взаимное влияние наиболее значительно, вычисленные аэродинамические коэффициенты c_e на несущие конструкции совершенно не соответствовали нормативным значениям. В тех случаях, когда взаимное влияние минимально, вычисленные аэродинамические коэффициенты c_e хорошо соответствовали нормативным (0.8 – наветренная сторона, -0.5 – подветренная сторона, -1.0 – угловые зоны), отклоняясь от них с наветренной стороны не более, чем на 20% в большую сторону. С подветренной стороны и в угловых зонах наибольшие отклонения

присутствуют только в малых локальных зонах, а в основном отклоняются не более чем на 30% в большую сторону от нормативных.

На основе полученных результатов была проведена оценка пешеходной комфортности по 3-м нормативно регламентированным критериям (согласно МДС 20-1.2006):

– выполнение допустимого уровня (1000 часов в год) пешеходной комфортности по первому критерию ($V_{cr1} = 6 \text{ м/с}$) показано голубым цветом (рисунок 6.1.12). Остальные цветовые зоны соответствуют зонам превышения допустимого уровня пешеходной комфортности по первому критерию и наблюдаются во внутренней дворовой зоне между рассматриваемыми зданиями МЖК и на возвышенностях;

– выполнение допустимого уровня (50 часов в год) пешеходной комфортности по второму критерию ($V_{cr2} = 12 \text{ м/с}$) показано голубым цветом (рисунок 6.1.13). Остальные цветовые зоны соответствуют зонам превышения допустимого уровня пешеходной комфортности по второму критерию и носят локальный характер во внутренней дворовой зоне между рассматриваемыми зданиями МЖК и на возвышенностях;

– выполнение допустимого уровня (5 часов в год) пешеходной комфортности по третьему критерию ($V_{cr3} = 20 \text{ м/с}$) показано голубым цветом (рисунок 6.1.14). Остальные цветовые зоны соответствуют зонам превышения допустимого уровня пешеходной комфортности по третьему критерию и носят локальный характер с превышением в 2 раза в непосредственной близости и угловых зонах корпусов 1-5 и на возвышенностях.

Область превышения критериев пешеходной комфортности внутри МЖК почти полностью перекрывается областью зелёных насаждений, отображенных в исходных данных. Поэтому следует ожидать значительного улучшения пешеходной комфортности в указанной зоне.

6.2 Расчётное определение аэродинамических коэффициентов на промышленное сооружение (копер ствола рудника)

6.2.1 Общие сведения

В данном разделе приведен пример расчётного исследования промышленного сооружения (копра ствола рудника), цель которого определение аэродинамических коэффициентов. Для решения поставленной задачи были выполнены следующие задачи:

- проведён анализ ветровых режимов района строительства, рельефа местности и окружающей застройки около рассматриваемого объекта, особенности расчётов ветрового нагружения зданий, сооружений и комплексов в отечественных и зарубежных нормативных документа;

- разработана и верифицирована трёхмерная расчетная модель комплекса объектов ствола СКС-1 для постоянного периода, учитывающая следующие здания и сооружения: Копёр башенного типа с учётом лестницы, Здание клетевой подъёмной машины с канатной галереей, Здание скиповой подъёмной машины, Надшахтное здание с механизированным вагонообменом, Технологические здания №1 и №2, Установка кондиционирования рудничного воздуха (УКРВ), Градирня УКРВ, Градирня, Насосная станция, ТП 6/0,4 кВ общих потребителей, Эстакада, Конвейерная галерея для выдачи руды, Здания и сооружения соседних площадок строительства (ВСС-1 и ВЗС-1), находящиеся в радиусе 500 м от Копра башенного типа площадки СКС-1;

- определены аэродинамические коэффициенты и давления на несущие конструкции Копра башенного типа СКС-1 постоянного периода с учётом окружающей застройки при 24-х направлениях ветра (через 15°);

- произведено сравнение аэродинамических коэффициентов среднего давления c_e , определённых на основе численного решения трёхмерных задач аэродинамики, с нормативными значениями.

6.2.1.1 Краткая характеристика комплекса сооружений ствола СКС-1 рудника

Район строительства комплекса сооружений расположен в Красноярском крае. Назначение зданий – промышленные здания и сооружения. Уровень ответственности – 1 (повышенный).

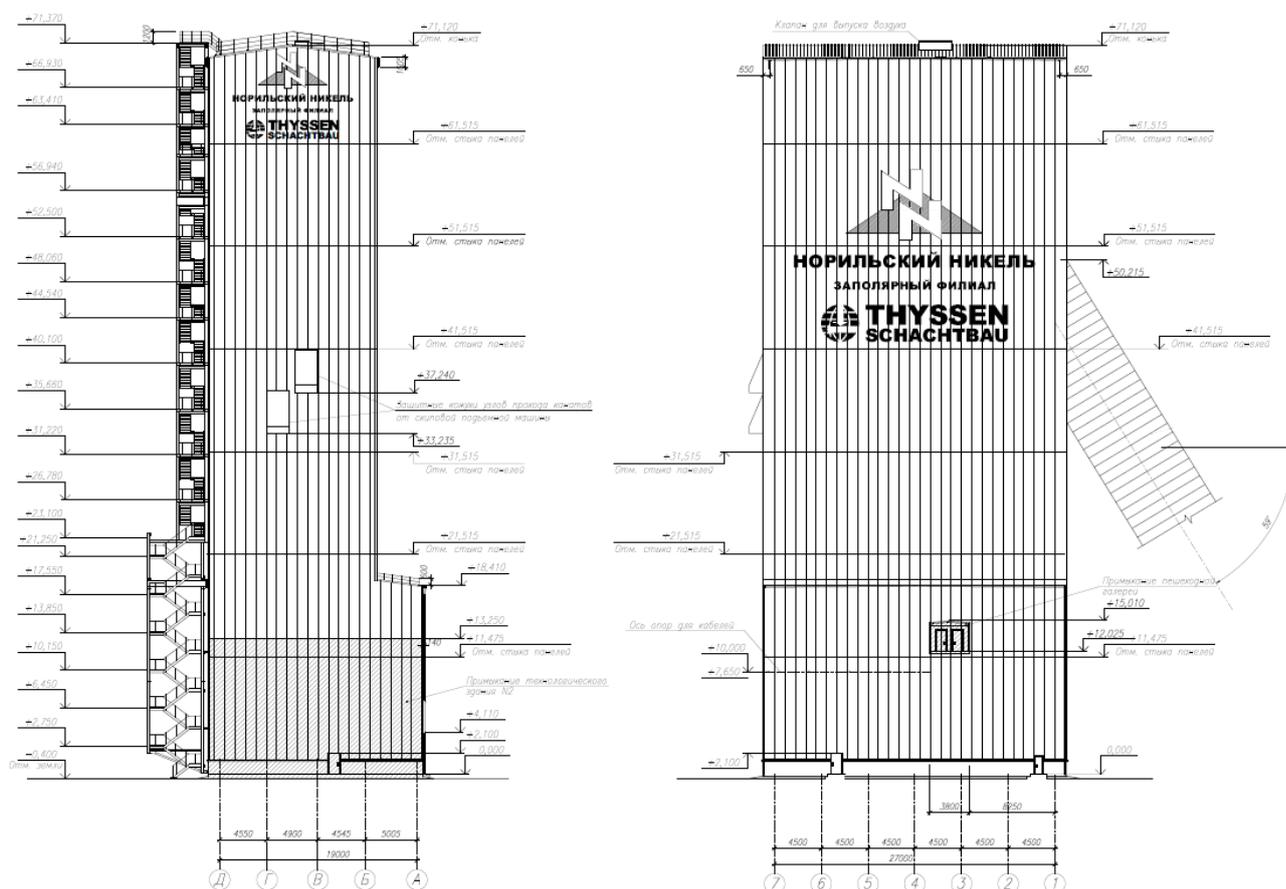


Рисунок 6.2.1 -Здание Копра СКС-1, фасады Д-А и 7-1.

6.2.1.2 Площадка строительства и окружающая застройка.

Участок под строительство комплекса сооружений рудника СКС-1 располагается в Красноярском крае, вблизи г. Норильск и соответствует ветровому району V и типу местности «А».

В зоне площадки строительства СКС-1 перепад рельефа местности достигает ~30 м. В радиусе 100 метров от Копра СКС-1 перепад рельефа не превышает ~3 м, что позволяет рассматривать аэродинамику сооружений ствола СКС-1 рудника без учёта рельефа.

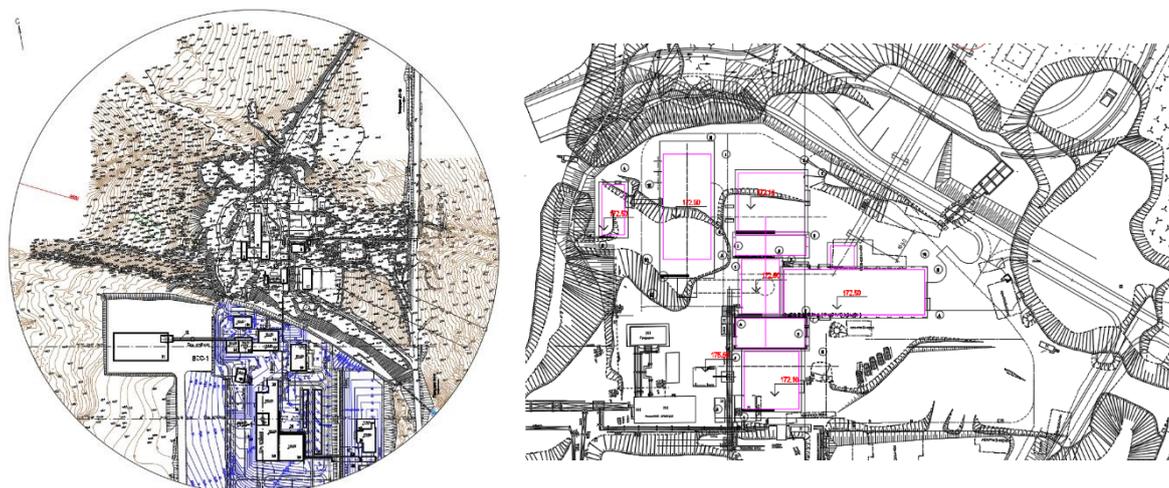


Рисунок 6.2.2 – Слева - Генеральный план участка строительства в радиусе 500 метров от Копра SKS-1 временного периода; справа - фрагмент генерального плана участка строительства постоянного периода.

6.2.1.3 Ветровые режимы зоны строительства

Участок строительства находится на территории Норильского промышленного района Красноярского края. В соответствии с СП 20.13330 значение нормативного давления равно 600 Па, что соответствует скорости ветра на высоте 10 м над землей 31.4 м/с. Расчётное ветровое давление с учётом коэффициента надёжности по нагрузке 1.66 и с учётом коэффициента для типа местности $k(z_e = 10 \text{ м}) = 1.00$ равняется 1000 Па, что соответствует скорости ветра на высоте 10 м над землей 40.4 м/с.

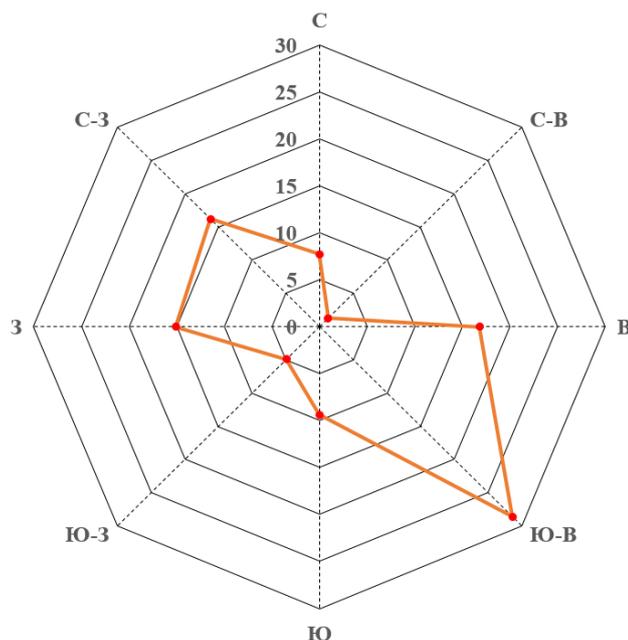


Рисунок 6.2.3 – Направление и повторяемость ветров (%) по данным, взятым из Интернета.

6.2.2 Разработка расчётной модели

6.2.2.1 Геометрическая модель комплекса сооружений

Практическая подготовка модели начинается с создания геометрической объемной модели сооружения. Геометрия исследуемых сооружений выполнена согласно исходным данным. Построенные геометрические трёхмерные модели Сооружений ствола СКС-1 рудника показаны на рисунке 6.2.4

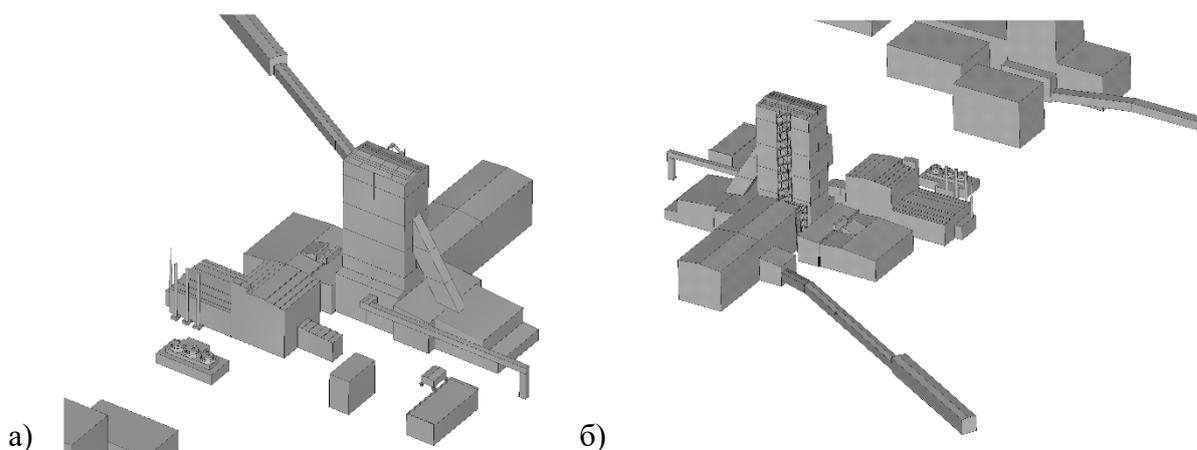
Сооружения, которые не могут оказать значимого влияния на ветровые нагрузки, приходящиеся на несущие конструкции Копра СКС-1, не учитывались в геометрической модели:

а) здания ГПП, ФКУ и РТП, т.к.:

– представляют собой продуваемые сквозные этажерки с контейнерами;

— имеют меньшую высоту, чем находящиеся между ними и Копром Здание клетевой подъёмной машины с канатной галереей и Технологическое здание №1, находящиеся между ними и Копром.

б) необшитые сквозные опоры Конвейерной галереи, верхний и нижний необшитые ярусы трехэтажной Эстакады, средняя необшитая опора трехэтажной Эстакады, их наружные лестницы, сквозная необшитая одноярусная технологическая Эстакада до ГПП, т.к. представляют собой продуваемые сквозные конструкции, которые не оказывают существенного влияние на ветровые нагрузки, приходящиеся на несущие конструкции Копра СКС-1.



в)

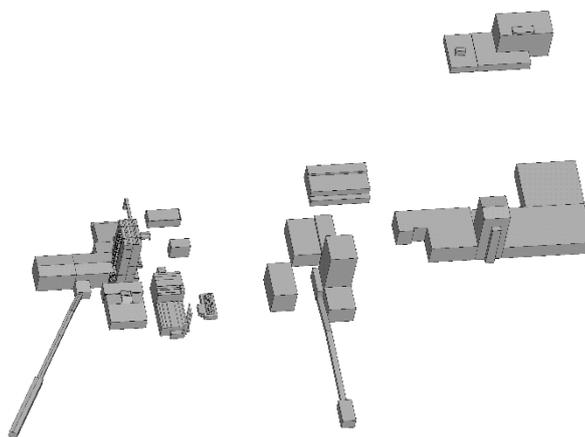


Рисунок 6.2.4 – Геометрическая модель сооружений
а) вид 1; б) вид 2; в) вид 3

6.2.2.2 Расчётная сетка

Расчётная воздушная область формируется следующим образом: после создания в программном комплексе объёмная геометрическая модель сооружений ствола СКС-1 рудника «вычитается» из модели воздушного пространства (в форме цилиндра высотой 0.3 км, радиусом 1.0 км). Далее полученная расчётная область разбивается на конечные объёмы.

Лестница, примыкающая к башне копра, моделировалась при помощи метода «погруженных границ».

Для проведения основных аэродинамических расчётных исследований были приняты следующие характерные размеры элементов:

- на поверхности сооружений и земли в радиусе 0.1 км от оси ствола принят равными – 0.75 м;
- с удалением от целевого объекта на поверхности земли – до 9 м, на поверхности зданий – до 6 м;
- максимальный размер элементов в расчётной области – 18 м (в радиусе 555-1000 м).

Общий размер основной расчётной конечнообъёмной (КО) модели составил: 6.7 млн. элементов.

Расчётная модель представлена на рисунке 6.2.5.

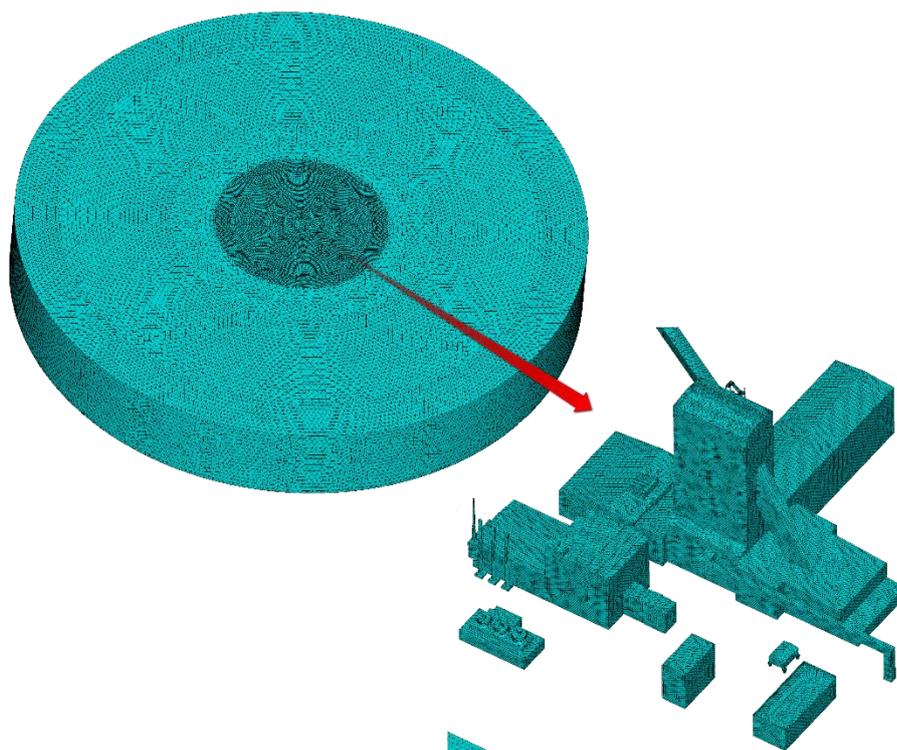


Рисунок 6.2.5 – Сооружения ствола СКС-1 рудника
а) конечнообъёмная модель воздушного пространства (6 706 062 КО);
б) сетка на поверхности зданий (размер элемента 0.75 м).

6.2.2.3 Граничные условия

Области расчёта заданы следующие физические параметры: тип среды – несжимаемый воздух при температуре (25°C) и давление 1 атм.

Граничные условия на «входе» (INLET) соответствуют ветровому району V и типу местности A («открытая местность»). Профили давлений и пульсаций были пересчитаны для ввода в программный комплекс в аналогичные зависимости от вертикальной координаты для скорости, кинетической энергии турбулентности и энергии диссипации, соответствующие расчётным значениям нагрузок с учётом коэффициента надёжности по нагрузке 1.66. Масштаб турбулентности принят равным 300 м в соответствии с рекомендациями Eurocode.

На «выходе» (OUTLET) и на верхней границе области потоку назначаются «мягкие» граничные условия Opening с нулевыми дополнительными давлениями и такими же параметрами турбулентности, как и на «входе».

На «земле» и на всех зданиях задано условие «стенки с прилипанием» ($u = v = w = 0$ м/с), исключающее проникновение вещества через поверхность.

В качестве начальных условий во всей расчётной области задавались нулевые скорости ($u = v = w = 0$ м/с) и нулевые дополнительные давления.

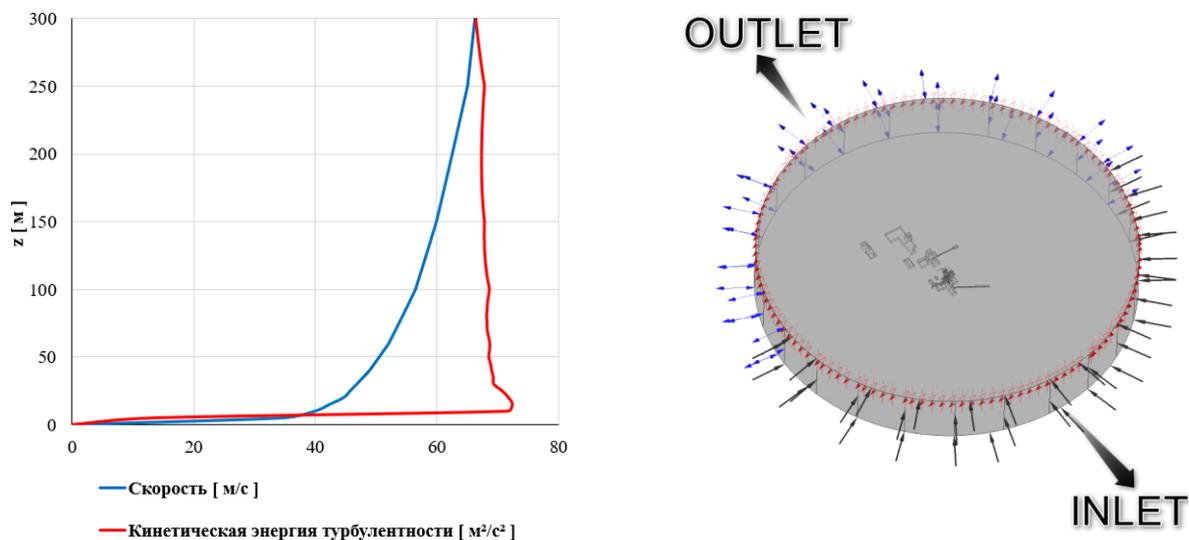


Рисунок 6.2.6 – Слева – Профили кинетической энергии турбулентности TKE (красная линия), m^2/c^2 , и горизонтальной составляющей скорости ветра V (синяя линия), м/с, тип местности А («открытая местность»), справа – расчётная область с обозначенными граничными условиями для угла атаки ветра 0° .

6.2.2.4 Параметры расчётов

Наиболее опасные направления ветра определялись на основе выполненных трёхмерных расчётных исследований в стационарной постановке с использованием модели турбулентности RANS SST для Сооружений ствола СКС-1 рудника «Скалистый» при 24-х направлениях ветра (через 15°) без учёта рельефа.

Критерием окончания счёта назначено максимальное количество итераций – 150 или достижение максимальных невязок по давлению и по всем компонентам скорости 10^{-5} .

Минимальные и максимальные значения локальных давлений оценивались с использованием вычисленных средних значений давления, величины кинетической энергии турбулентности из стационарного расчёта. Коэффициенты обеспеченности θ_{\min} и θ_{\max} для определения пиковых значений и пульсационной

составляющей давления по опыту проведенных ранее расчётов приняты согласно методике (пп. 5.4).

6.2.3 Результаты аэродинамических расчётов

Ниже представлены полученные результаты многовариантных расчётных исследований без учёта окружающего рельефа, но с учётом застройки:

– средние значения суммарных расчётных ветровых нагрузок на несущие конструкции Копра СКС-1 в строительных осях сооружений (F_x , F_y , кН) и векторная сумма нагрузки (F_R , кН) для рассматриваемых направлений ветра (рисунок 6.2.7);

– аэродинамические коэффициенты c_e ветрового давления на компоненты сбора аэродинамических нагрузок (рисунок 6.2.10) для Копра СКС-1; в табличном виде (таблица 6.2.1)

– средняя (P , Па), пульсационная (амплитуда или полуразмах, P_{puls} , Па) составляющие ветрового давления и Расчётное значение ветрового давления ($P_{sum} = P + k_{puls} \cdot P$) для соответствующих компонент (поверхность сбора аэродинамической нагрузки, рисунок 6.2.9) Копра СКС-1 в табличном виде (таблица 6.2.2).

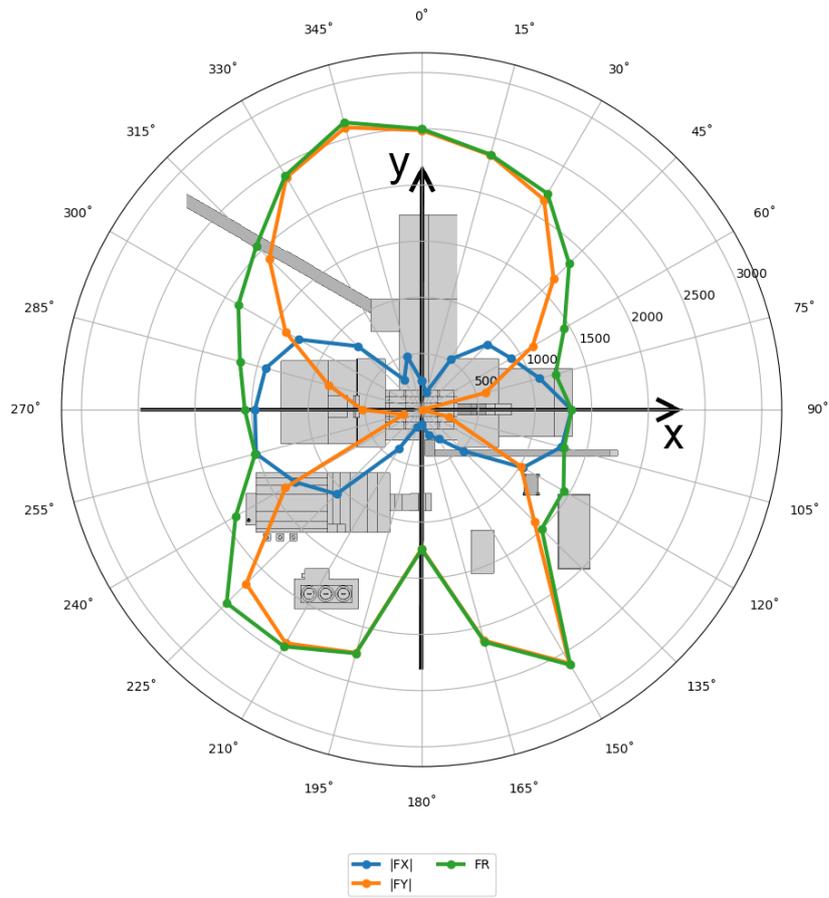


Рисунок 6.2.7 – Средние суммарные ветровые нагрузки на Копёр СКС-1 в зависимости от направления ветра, кН.

F_R – равнодействующая сила, F_x , F_y – проекции F_R на оси координат. (значения приведены по модулю).

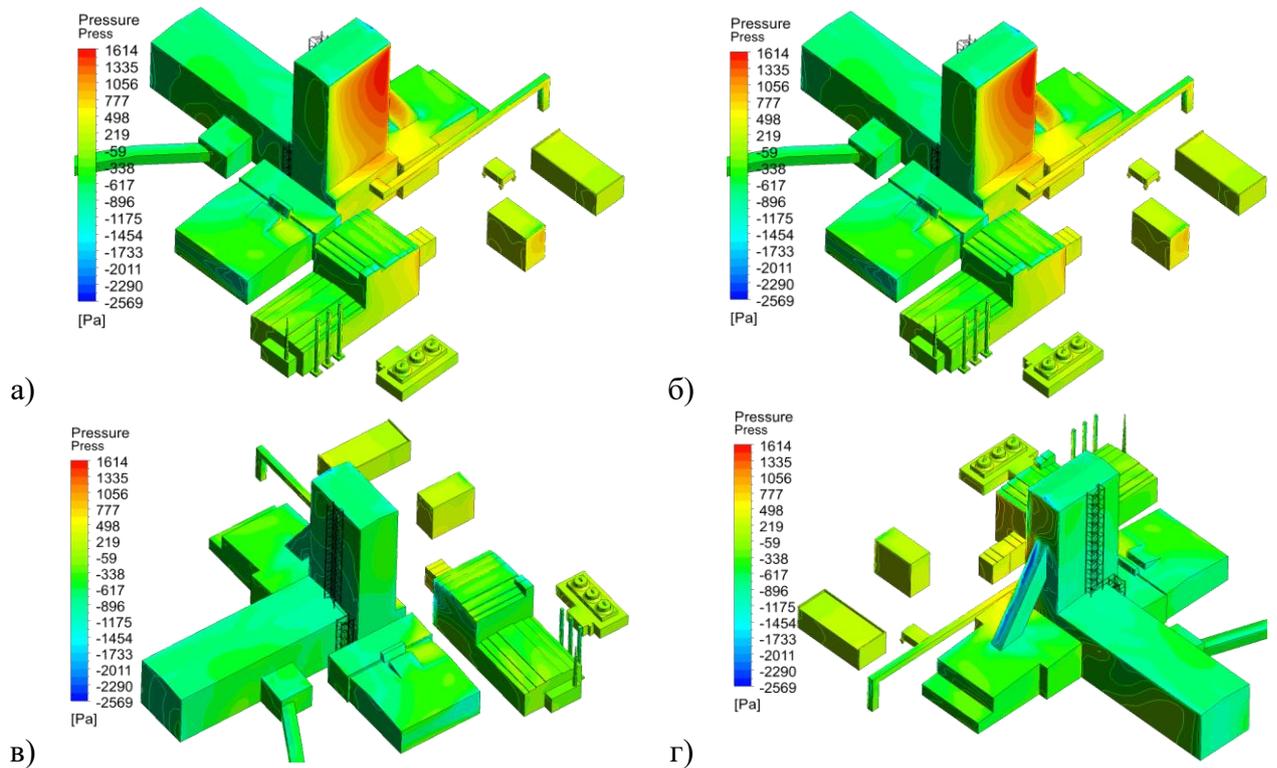


Рисунок 6.2.8 – Средние значения давлений (Па) на поверхности сооружений. Угол атаки ветра 150° . $\text{Max} = 1.61 \text{ кПа}$, $\text{Min} = -2.57 \text{ кПа}$
 а), б) виды с наветренной стороны; в), г) виды с подветренной стороны

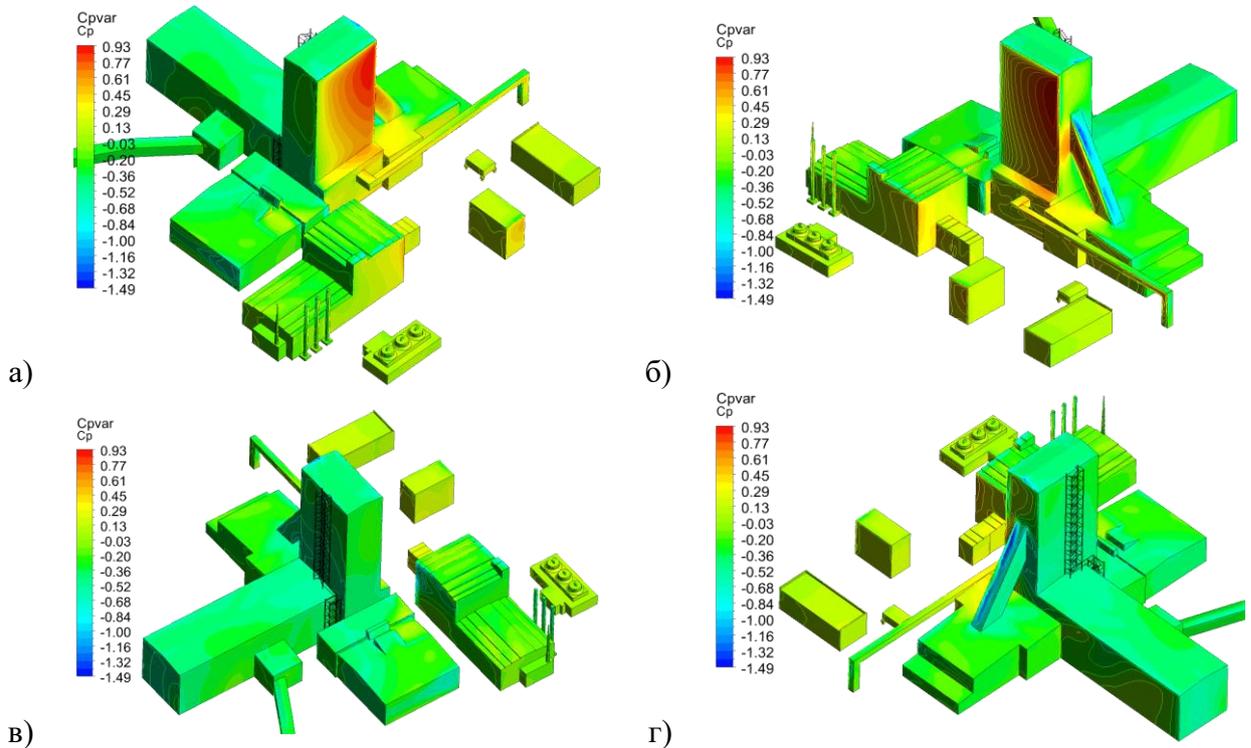


Рисунок 6.2.9 – Значения аэродинамического коэффициента на поверхности сооружений. Угол атаки ветра 150° . $\text{Max} = 0.93$, $\text{Min} = -1.49$
 а), б) виды с наветренной стороны; в), г) виды с подветренной стороны

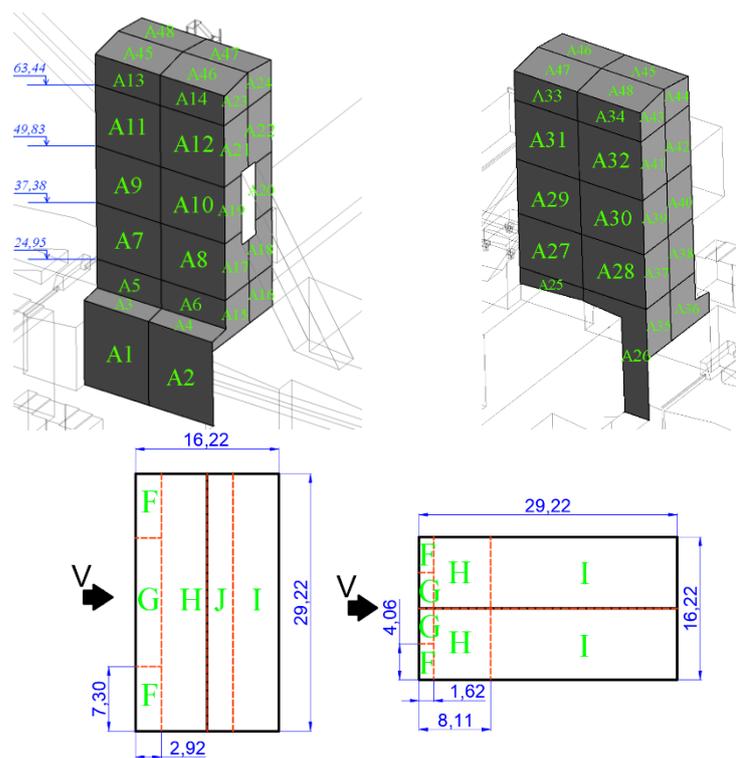


Рисунок 6.2.10 – Схема и нумерация компонент Копра СКС-1

Таблица 6.2.1 – Фрагмент. Значение аэродинамического коэффициента давления c_e на компонентах Копра СКС-1 в зависимости от направления ветра.

Направление ветра, °	A1	A2	A3	A4	A5	A6
0	-0.56	-0.43	-0.84	-0.58	-0.80	-0.56
15	-0.43	-0.39	-0.36	-0.38	-0.41	-0.41
30	-0.40	-0.60	-0.56	-0.53	-0.63	-0.52
45	-0.48	-0.62	-0.63	-0.57	-0.64	-0.60

Таблица 6.2.2 – Фрагмент. Расчётное значение давления (Па) ($P_{sum} = P + k_{puls} \cdot P$) на компонентах Копра СКС-1 в зависимости от направления ветра.

Направление ветра, °	A1	A2	A3	A4	A5	A6
0	-965	-743	-1455	-1002	-1378	-964
15	-736	-676	-628	-659	-705	-715
30	-691	-1038	-972	-913	-1083	-897
45	-827	-1074	-1091	-992	-1116	-1029

6.2.4 Анализ результатов и выводы

В результате анализа полученных результатов было выявлено, что максимальное Расчётное значение средней составляющей равнодействующей аэродинамической силы (F_R) на несущие конструкции Копра СКС-1 реализуется при угле атаки ветра 345° и составляет 2647 кН. Также опасным углом атаки ветра является 150° , для которого значение средней составляющей равнодействующей аэродинамической силы (F_R) составляет 2622 кН.

С точки зрения реализации максимальной равнодействующей аэродинамической силы (F_R) наиболее характерными и опасными углами атаки ветра для Копра СКС-1 являются 150° (близок к наиболее повторяемому ЮВ направлению ветра), 345° . С точки зрения прочностных расчётов характерными и опасными могут также являться направления угла атаки ветра 0° и 270° .

Угол атаки ветра 180° , не является опасным для Копра СКС-1, так как в этом случае здание копра находится в следе сооружений соседних площадок строительства (ВСС-1 и ВЗС-1).

В результате сопоставления значений аэродинамического коэффициента среднего давления c_e , полученных в результате численного моделирования и по нормативным документам, были сделаны следующие выводы:

а) значения аэродинамических коэффициентов c_e на наветренной стороне Копра СКС-1, определённые в результате численного моделирования, меньше нормативных значений;

б) значения аэродинамических коэффициентов c_e на подветренной стороне Копра СКС-1, определённые в результате численного моделирования, по модулю меньше нормативных для большинства компонент. На остальных компонентах значения, определённые с помощью численного моделирования, превышают по модулю нормативные значения максимум на 18%;

в) значения аэродинамических коэффициентов c_e на крыше Копра СКС-1, определённые в результате численного моделирования, по модулю меньше нормативных для большинства компонент. На остальных компонентах значения,

определённые с помощью численного моделирования, превышают по модулю нормативные значения максимум на 51%;

г) в целом нормативные значения аэродинамических коэффициентов c_e , определённые согласно СП 20.13330 выше, чем определённые с помощью численного моделирования. В прочностных расчётах можно использовать «в запас» нормативные значения аэродинамических коэффициентов c_e .

6.3 Расчётное определение средних и пульсационных составляющих ветровых нагрузок на несущие конструкции ветроэнергетической установки с фиксированными лопастями

6.3.1 Общие сведения

В данном разделе приведен пример расчётного исследования ветроэнергетической установки с фиксированными лопастями (далее ВЭУ), цель которого определение средних и пульсационных составляющих ветровых нагрузок на несущие конструкции ветроэнергетической установки с фиксированными лопастями. Для решения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

- проведён анализ ветровых режимов района строительства, постановка задач расчётных исследований.
- разработаны и верифицированы расчётные трёхмерные расчетные аэродинамические модели для проведения исследований.
- определение средней и пульсационной составляющих аэродинамических нагрузок на несущие конструкции и фундамент ВЭУ при различных направлениях "ураганного" ветра (шаг 45°) в трёхмерной нестационарной постановке для двух вариантов фиксации положения лопастей.

6.3.1.2 Краткая характеристика конструкций ВЭУ

Площадка под проектируемый комплекс ВЭУ находится в е Ульяновской области.

Рассматриваемая ветровая турбина принадлежит к типу турбин с прямым приводом и синхронным генератором с постоянными магнитами и внешним ротором.

Для ветровой турбины используется башня типа стальной трубы с антикоррозийным красочным покрытием. Высота башни составляет 88 м, а высота оси турбины 90 м.

Лопастя соединены с втулкой и генератором при помощи высокопрочных болтов. Втулка имеет сферическую конструкцию корпуса.

Согласно исходным данным, при ураганном ветре лопасти находятся во флюгерном положении.

Рама (включающая главную и вспомогательную рамы) имеет компактную изящную конструкцию. Главная рама при помощи болтов соединена с генератором и верхом башни. Вспомогательная рама при помощи болтов прикреплена к главной раме.

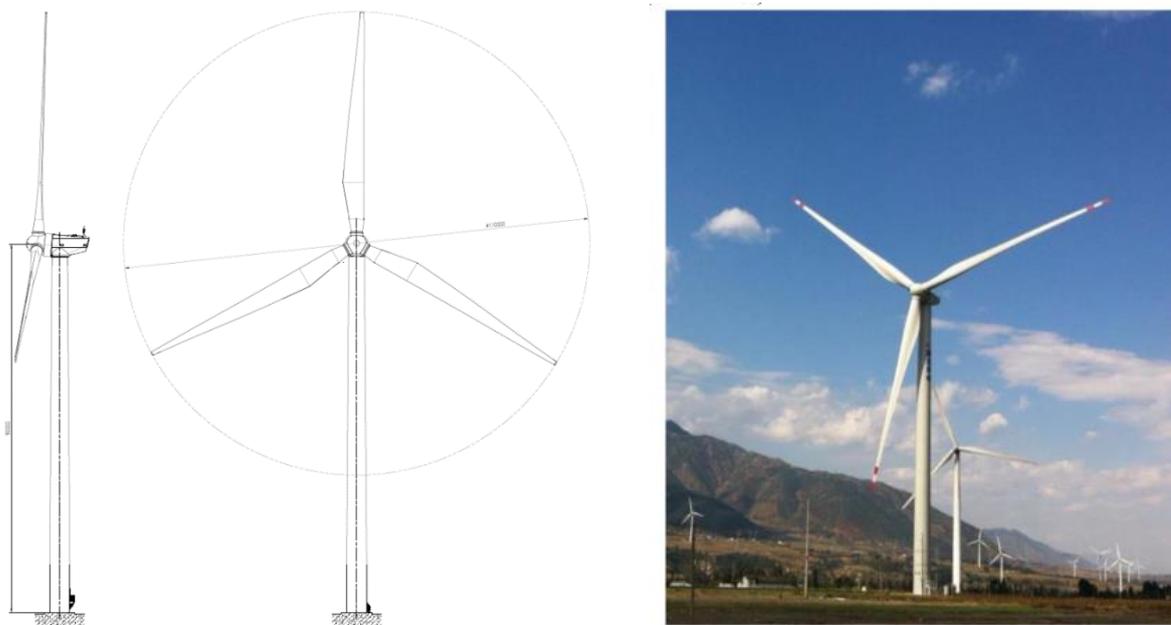


Рисунок 6.3.1 — Общий вид ВЭУ

6.3.1.3 Ветровые режимы и зоны строительства

Для оценки ветровых нагрузок необходимо применение метеорологии, микрометеорологии и климатологии. Метеорология даёт описание и объяснение основных характерных особенностей атмосферных течений. Микрометеорология описывает структуры атмосферных течений вблизи поверхности земли.

Площадка под проектируемые сооружения ВЭУ, расположенная в Ульяновской области, соответствует ветровому району – II, типу местности А – открытые побережья морей, озер и водохранилищ, сельские местности, в том числе с постройками высотой менее 10 м, пустыни, степи, лесостепи, тундра.

Таким образом, в соответствии с СП 20.13330 значение нормативного давления составляет 300 Па, что соответствует скорости ветра на высоте 10 м над землей 21.9 м/с. Расчётное ветровое давление с учётом коэффициента

надёжности по нагрузке 1.4 и коэффициента для типа местности $k(z_e = 10 \text{ м}) = 1$ составляет 355 Па, что соответствует расчётной скорости ветра на высоте 10 м над землей 25.9 м/с.

Рассматриваемый ВЭУ проектировался согласно [33], поэтому рекомендации по расчету на экстремальные параметры ветрового потока принимаются согласно этому стандарту. Экстремальный ветровой поток характеризуется следующими явлениями:

а) среднесрочное появление ураганного значения скорости ветрового потока;

б) появление экстремальной турбулентности ветрового потока на высоте оси ВЭУ;

в) экстремальная смена направления ветрового потока (косой обдув)

Появления штормового значения скорости ветрового потока осредненного за 10-ти минутный интервал времени принято рассматривать за период 1 год и 50 Для высоты оси ВЭУ значения штормовых скоростей можно определить из выражения:

$$V_{e50} = 1.4V_{ref}$$

Значение экстремальной турбулентности определяется исходя из того, что вертикальный профиль ветрового потока является нормальным. Тогда значение среднеквадратичного отклонения продольной составляющей σ определяется выражением

$$\sigma_1 = cI_{ref} \left(0.072 \left(\frac{V_{ave}}{c} + 3 \right) \left(\frac{V_{hub}}{c} - c \right) + 10 \right); \quad c = 2 \text{ м/с}$$

Экстремальная смена направления ветрового потока характеризуется углом ψ , который может меняться в пределах $\pm 180^\circ$.

На рисунке 6.3.2 изображено сравнение профилей скорости ветра согласно стандарту IEC 61400 [33] и согласно СП 20.13330, умноженному на коэффициент 1.4.

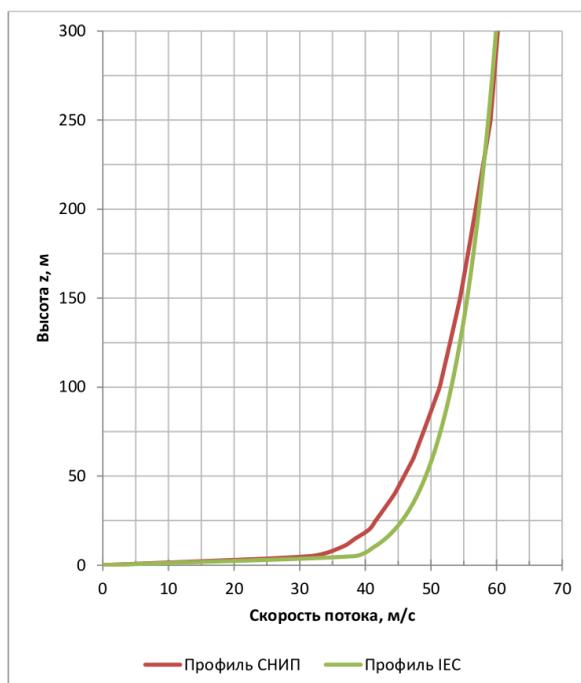


Рисунок 6.3.2 – Сравнение профилей горизонтальной составляющей скорости ветра u [м/с] согласно СП 20.13330 для ветрового района II, типа местности А («чистое поле») и согласно ИЕС 61400-1.

6.3.2 Разработка и верификация расчётной модели

6.3.2.1 Геометрические модели ВЭУ

Практическая подготовка модели начинается с создания геометрической объемной модели сооружения. Геометрия одиночной ВЭУ выполнена согласно исходным данным. При создании трёхмерной геометрической модели ВЭУ в программном комплексе максимально учитывалась реальная геометрия (башня, гондола, лопасти и т.п.), что немаловажно для адекватной оценки аэродинамических давлений, их локальных экстремумов и распределения по поверхности ВЭУ (рис.6.3.3).

Поскольку после остановки ВЭУ направление ветра может резко меняться, а ВЭУ при этом может не успевать реагировать (принять положение, при котором направление ветра перпендикулярно плоскости вращения лопастей), было решено рассмотреть несколько направлений ветра (от 0 до 180 с шагом 45, в силу симметрии задачи) для определения наихудшего с точки зрения нагрузок на несущие конструкции и фундамент случая. Также для определения влияния

лопасти на башню, рассматривались два положения лопастей, изображенных на рис.6.3.4.

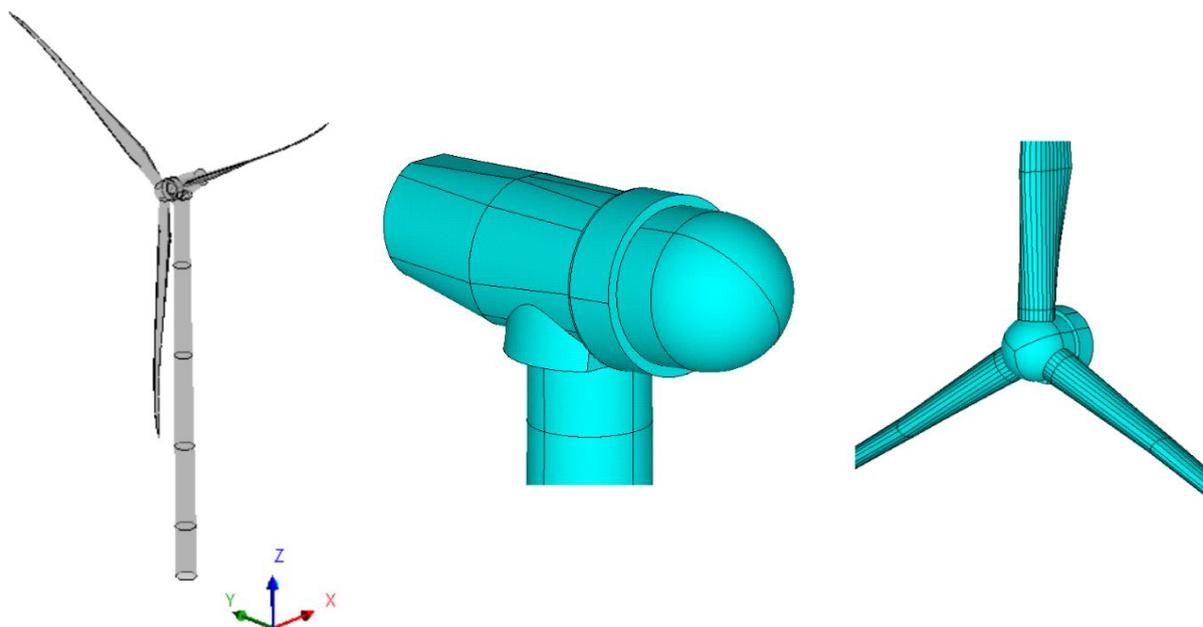


Рисунок 6.3.3 – Геометрическая модель одиночной ВЭУ

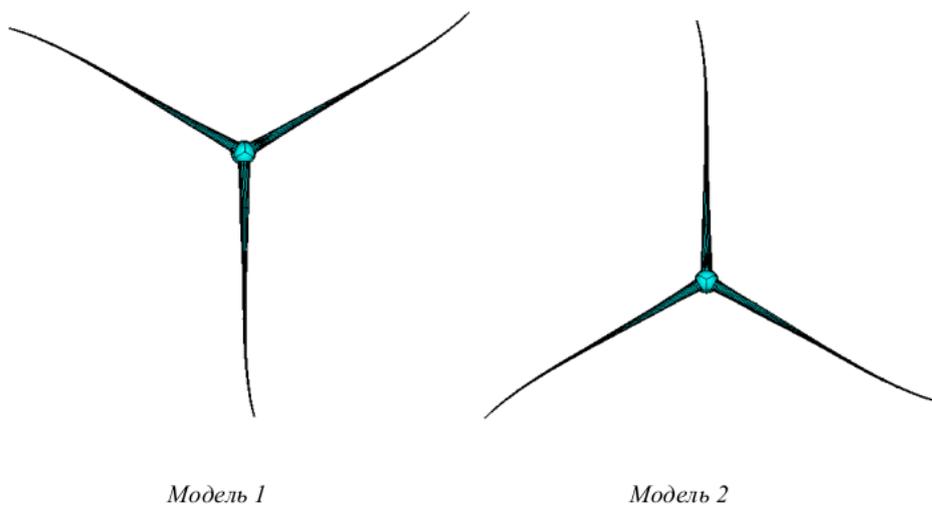


Рисунок 6.3.4 – Положения лопастей для расчётных исследований.

6.3.2.2 Расчётная модель и сетка КО

Расчетная модель формируется следующим образом: после создания в программном комплексе объемной геометрической модели ВЭУ, она «вычитается» из модели воздушного пространства (в форме цилиндра высотой 250 м и радиусом 300 м). Далее полученный расчётная область разбивается на конечные объемы.

Во всей модели около ВЭУ был построен пограничный слой. Размеры элементов были приняты следующие:

- расстояние до первого узла от стенки в пограничном слое – 0.0003 м;
- вдоль окружности – 0.03 м;
- по высоте башни – 0.1 м;
- на поверхностях лопастей и гондолы – 0.1 м;
- в ближайшем объеме около ВЭУ – 0.13125 м;
- максимальный размер элемента в объеме – 9 м.

Количество конечных объёмов в данной модели ~ 31 млн (рис 6.3.5)

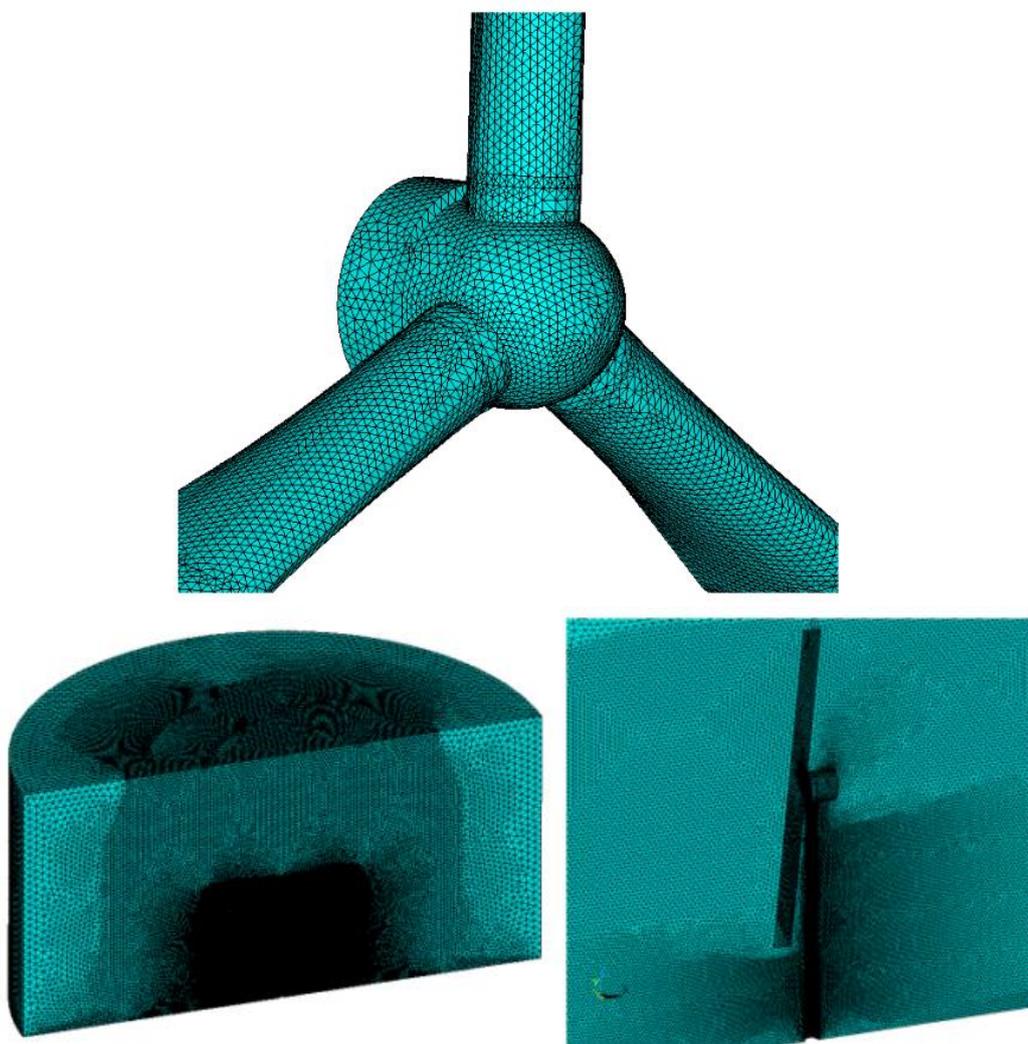


Рисунок 6.3.5 – Фрагменты КО-сетки расчётной области радиусом 300 м. Количество узлов/конечных объёмов ~ 31 млн.

6.3.2.4 Граничные и начальные условия

Области расчёта присвоены следующие физические параметры: тип среды – несжимаемый воздух при температуре (25°C) и давление 1 атм.

Граничные условия на «входе» (INLET) задавались в соответствии с [33]. Зависимости от вертикальной координаты для скорости, кинетической энергии турбулентности и энергии диссипации:

$$V_{e50}(z) = 1.4V_{ref} (z_{hub})^{0.11}$$

$$V_{ref} = 37.5 \frac{M}{c}; \quad z_{hub} = 90M$$

$$\sigma_1 = cI_{ref} \left(0.072 \left(\frac{V_{ave}}{c} + 3 \right) \left(\frac{V_{hub}}{c} - c \right) + 10 \right); \quad c = 2M/c$$

$$V_{ave}(z) = 0.2 \cdot V_{ref}; \quad V_{hub} = 1.4 \cdot V_{ref}; \quad I_{ref} = 0.16$$

$$I = \frac{\sigma_{ave}}{V_{hub}}; \quad \Lambda = 42M$$

Согласно этим формулам, на входе задавались интенсивность турбулентности и масштаб турбулентности, равный 42 м в соответствии с рекомендациями [33].

На «выходе» (OUTLET) из области потоку назначаются «мягкие» граничные условия Opening с нулевыми дополнительными давлениями и такими же параметрами турбулентности, как и на «входе».

Сверху области задается условия «стенки с проскальзыванием».

На «земле» и на всех зданиях задано условие «стенки с прилипанием», ($u = v = w = 0$ м/с), исключающее проникновение вещества через поверхность.

В качестве начальных условий во всей области задавались нулевые скорости ($u = v = w = 0$ м/с) и нулевые дополнительные давления.

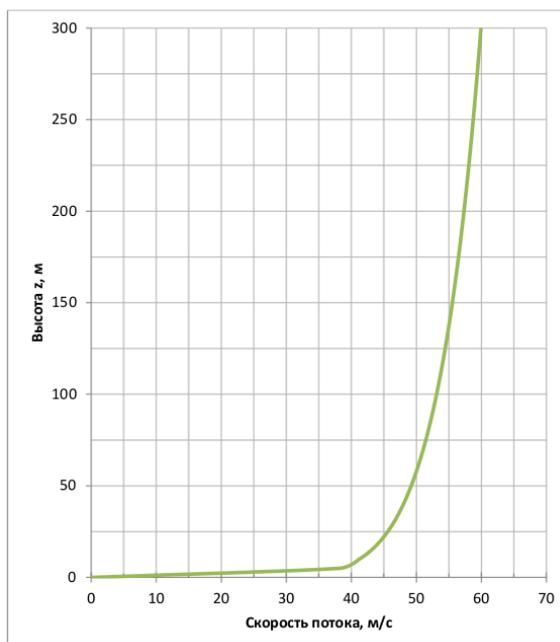


Рисунок 6.3.6 –Профиль горизонтальной составляющей скорости ветра и [м/с] согласно [33]

Д
Л
я

6.3.2.5 Параметры расчёта

э

Средние и пульсационные ветровые нагрузки на фундамент, а также главные частоты срыва вихрей определялись нестационарным расчетом с использованием модели турбулентности DES SST [31].

С
Т

Физическое расчётное время оставило 30 с. В процессе расчёта отслеживались аэродинамические нагрузки на все части ВЭУ. Собранные данные после обрабатывались для получения средней и пульсационной составляющей и частоты срыва вихрей. Обработка происходила после 15 секунды, когда колебания «устанавливаются».

е

а

Б
Н

Г

о

6.3.3 Результаты аэродинамических расчётов

Ниже представлены полученные результаты многовариантных расчётных исследований:

е
Т

Р
о

– суммарные силы на фундамент ВЭУ от времени и спектральные плотности мощности суммарных сил на фундамент ВЭУ для угла атаки 0° (рисунки 6.3.7);

о

о

– средние и пульсационные значения суммарных расчётных ветровых нагрузок на несущие конструкции ВЭУ в упомянутых выше осях (F_x, F_y, F_z , кН),

П
о

о

к

а
;

векторная сумма нагрузки (F_R , кН, рисунок 6.3.8) и моменты относительно осей (M_X, M_Y, M_Z , кН·м) для 5-х направлений (шаг по углу 45°).

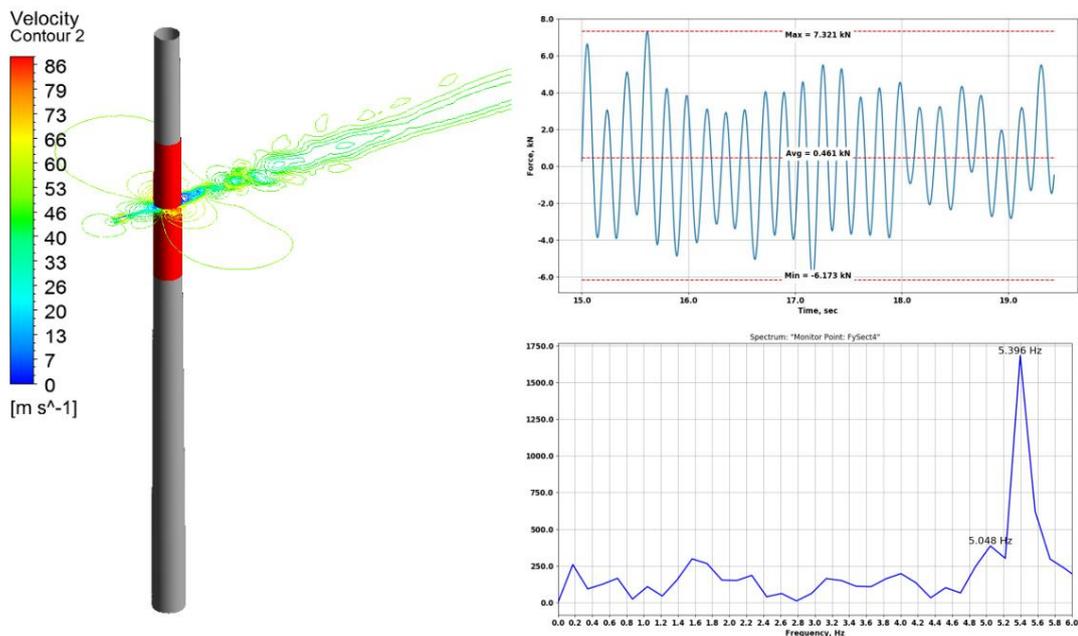


Рисунок 6.3.7 – Изолинии скоростей на высоте 6 м. (слева), изменение силы F_Y [кН] на секцию (выделена красным) и её спектральная мощность

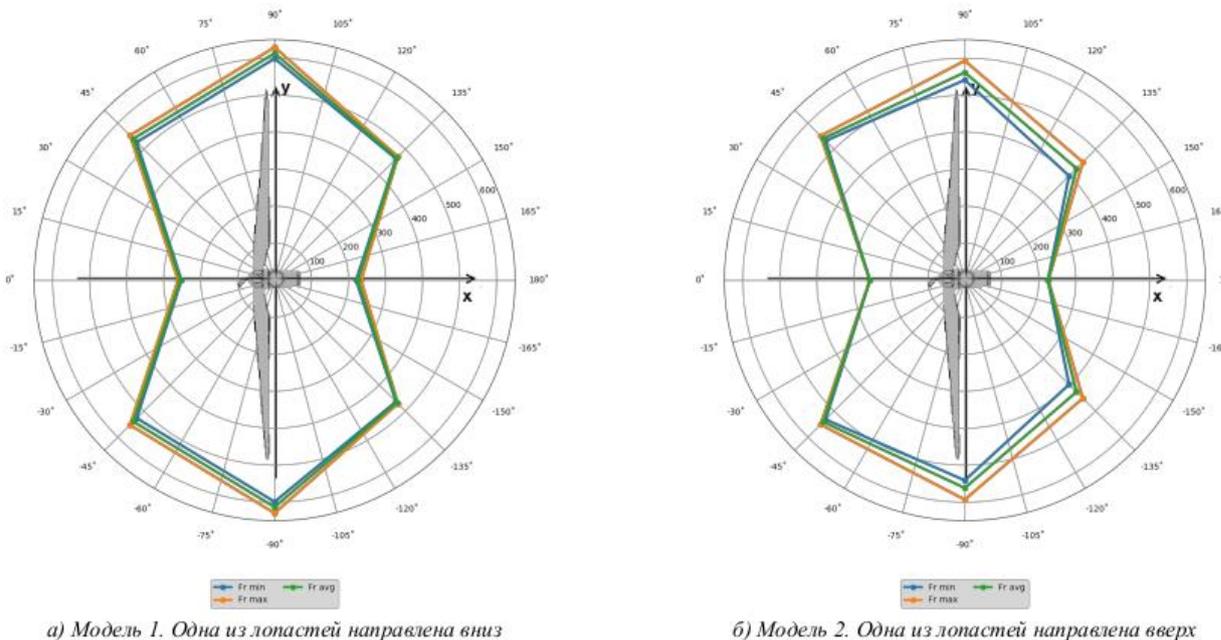


Рисунок 6.3.8 – Значение суммарной ветровой нагрузки F_R на фундамент от направления ветра, кН. (значения приведены по модулю)

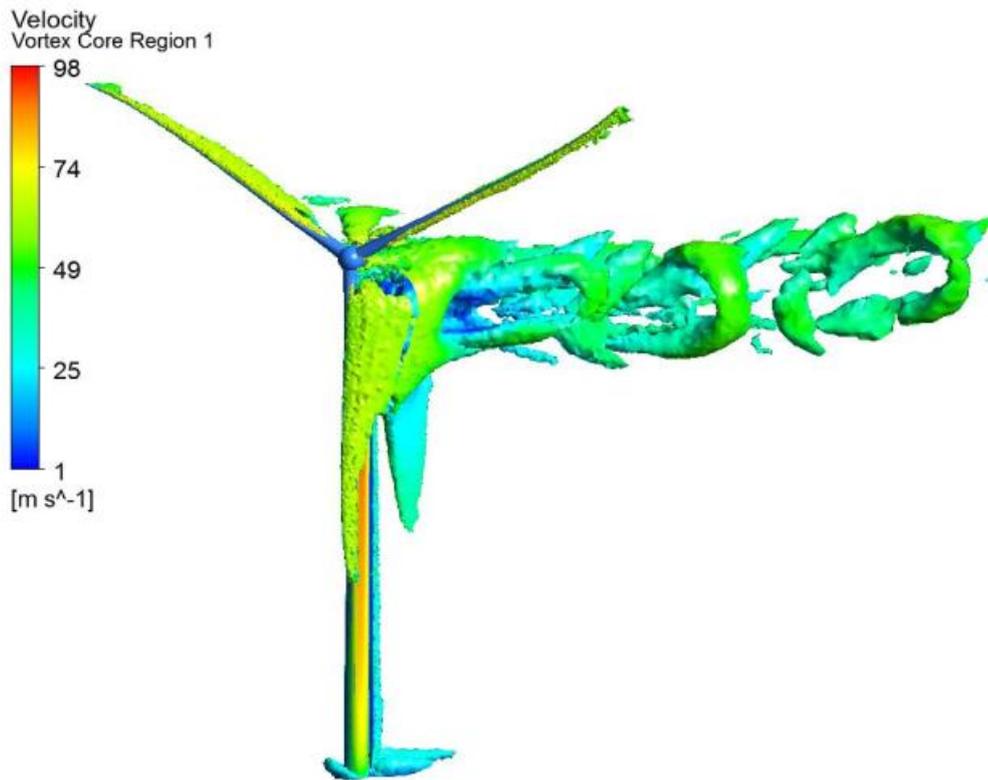


Рисунок 6.3.9 - Изоповерхности мощности локального «закручивания». Цветовые картины скоростей [м/с]. Модель 1. Угол атаки ветра 45°. Физический момент времени – 20 с.

6.3.4 Анализ и обобщение результатов

Результаты показали, что главные частоты срыва вихрей существенно меняются по высоте башни. Данный факт обусловлен изменениями по высоте горизонтальной составляющей скорости, диаметра башни, а также наличием лопасти, чьё сечение также сильно изменяется по высоте. На спектральной плотности мощности суммарной нагрузки на фундамент можно наблюдать множество частот срыва вихрей.

В результате проведенных расчётных исследований (при 5-ти направлениях ветра) аэродинамики ВЭУ для двух положений лопастей были определены наиболее опасные расчётные углы атаки ветра.

Для ВЭУ с первым положением лопастей (одна из лопастей направлена вниз) максимальное Расчётное значение средней составляющей равнодействующей аэродинамической силы (F_R) на фундамент реализуется при угле атаки ветра 90° и составляет 613 кН.

Для ВЭУ со вторым положением лопастей (одна из лопастей направлена вверх) максимальное Расчётное значение средней составляющей равнодействующей аэродинамической силы (F_R) на несущие конструкции реализуется при угле атаки ветра 90° и составляет 561.5 кН.

С точки зрения реализации максимальной равнодействующей аэродинамической силы (F_R) наиболее характерным и опасным углом атаки ветра также является 90° для обоих положений лопастей.

Для ВЭУ с первым положением лопастей (одна из лопастей направлена вниз) опасными с точки зрения средней составляющей изгибающего момента (M_X, M_Y) на фундамент являются углы атаки ветра 90° и 135° .

Для ВЭУ со вторым положением лопастей (одна из лопастей направлена вверх) опасными с точки зрения средней составляющей изгибающего момента (M_X, M_Y) на фундамент являются углы атаки ветра 90° и 135° .

Библиография

[1] Федеральный закон от 29 декабря 2004 г. N 190-ФЗ «Градостроительный кодекс Российской Федерации»

[2] МГСН 4.19-2005. Временные нормы и правила проектирования многофункциональных высотных зданий и комплексов в городе Москве.

[3] МДС 20-1.2006. Временные нормы по назначению нагрузок и воздействий, действующих на многофункциональные высотные здания и комплексы в Москве.

[4] ГОСТ Р 56728-2015 Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции

[5] Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том 1. – М.: Наука, 1973. – 536 с

[6] Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том 2. – М.: Наука, 1973. – 584 с

[7] Годунов С.К. (ред.) Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976. – 400 с

[8] Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 618 с.

[9] Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения – Пер. с англ. Б.Е.Маслова, А.В. Швецово́й; Под ред. Б.Е. Маслова. // М.: Стройиздат, 1984. – 360

[10] Волков К.Н., Емельянов В.Н. Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа. – М.: Физматлит, 2012. – 468 с.

[11] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 713 с.

[12] Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Афанасьева И.Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства. М., Издательство АСВ, 2017, 720 с.

[13] Казакевич М.И. Основы расчётов сооружений на ветровые воздействия. Монография. – М.: МГСУ, 2019. – 180 с.

[14] Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Афанасьева И.Н. Численное моделирование задач строительной аэродинамики. Разработка методик расчёта ветровых воздействий и исследование реальных объектов // Вестник МГСУ. 2010. №4-5. С. 182-185

[15] Белостоцкий А.М., Афанасьева И.Н., Ланцова И.Ю. Оценка пешеходной комфортности на основе численного моделирования ветровой аэродинамики зданий в окружающей застройке // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2019, 15, с. 24-39.

[16] Травуш В.И., Попов Н.А. Особенности определения ветровых нагрузок, действующих на высотные здания комплекса «Москва-Сити». // Вестник отделения строительных наук РААСН, Вып. 9, Белгород, 2005.

[17] Гувернюк С.В., Гагарин В.Г. Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на элементы ограждений высотных зданий. // Журнал АВОК. 2006. №8 стр. 18-24; 2007 №1 стр. 16-22.

[18] Дубинский С.И., Болотов П.Е. Верификация методики компьютерного моделирования для расчёта распределения давлений воздуха на наружные поверхности наружных ограждающих конструкций // Вестник МГСУ. 2011. №7. С. 276-282

[19] Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions, CEN, 2011.

[20] Davenport A.G. Gust loading factors. // Proc. of American soc. of civil Engineering, 1967, Vol. 93(1), No. ST3.

[21] Davenport A.G. The application of statistical concepts to the wind loading of structures. // Proc. Civ. Engineers., Vol. 19, August 1961, pp. 449-472.

[22] Donea J., Giuliani S., Halleux J.P. An arbitrary Lagrangian – Eulerian finite element method for transient dynamic fluid-structure interactions. // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1982, 33, pp. 689-723

[23] Raw M. A Coupled Algebraic Multigrid Method for the 3D Navier-Stokes Equations. // Proceedings of the 10th GAMM Seminar, 1995.

[24] Vickery B.J. On the reliability of gust loading factors. // Proceedings of the Technical Meeting Concerninf Wind Loads on Buildings and Structures. Building Sciences Series 30, National Bureau of Standarts, Washington, D.C., 1970

[25] Reynolds O. On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion // Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, 1895, Vol. 186

[26] Wilcox D.C. Turbulence Modelling for CFD. DCW Industries Inc., California, 1993.

[27] Menter F.R. Zonal two-equation k - ϵ turbulence models for aerodynamic flows. AIAA Paper 1993-2906

[28] Peskin C.S. Flow Patterns Around Heart Valves: A numerical Method // Journal of computational physics, Vol. 10, 1972, pp. 252-271.

[29] Iaccarino G., Verzicco R. Immersed boundary technique for turbulent flow simulations // Appl. Mech. Rev., Vol. 56(3), May 2003, pp. 331-347.

[30] Zheng, X., Montazeri, H., & Blocken, B. CFD simulations of wind flow and mean surface pressure for buildings with balconies: Comparison of RANS and LES // Building and Environment, Vol.173, 2020.

[31] Rezaeiha, A., Montazeri, H., & Blocken, B. On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines // Energy, Vol. 180, 2019, pp. 838–857.

[32] National Building Code of Canada. Ottawa, Associate Committee on the National Building Code, National Research Council, 2005.

[33] IEC 61400-1. Wind turbines - Part 1: Design requirements, Third edition, IEC, 2005.

[34] Japan Society of Civil Engineers (2009) : Standard Specifications for Steel and Composite Structures.