

**Методическое пособие**

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

## Содержание

Введение .....	4
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ .....	5
1.1 Область применения .....	5
1.2 Нормативные ссылки .....	5
1.3 Термины и определения .....	5
1.4 Общие требования .....	7
2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЗДАНИЯ, СООРУЖЕНИЯ И КОМПЛЕКСЫ. ....	9
2.1 Теоретические основы математического (численного) моделирования ветровых нагрузок и воздействий. ....	9
2.2. Требования к расчетной модели .....	11
2.3. Схема расчетных исследований.....	14
2.4. Расчетная оценка пиковых величин давлений на фасадные/ограждающие конструкции .....	16
2.5. Расчетная оценка пешеходной комфортности .....	17
2.6. Программная реализация численной методики определения ветровых нагрузок.....	19
3. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧИСЛЕННОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕТРОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ И КОМПЛЕКСОВ .....	20
3.1 Расчетное определение ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции и параметров пешеходной комфортности многофункционального жилого комплекса .....	20
3.1.1 Общие сведения .....	20
3.1.1.1 Краткая характеристика МЖК .....	20
3.1.1.2 Площадка строительства и окружающая застройка.....	21
3.1.1.3 Ветровые режимы зоны строительства .....	22
3.1.2 Разработка расчетной модели .....	23
3.1.2.1 Геометрическая модель комплекса жилых зданий в окружающей застройке .....	23
3.1.2.2 Расчетная сетка.....	23
3.1.2.3 Граничные и начальные условия.....	24
3.1.2.4 Параметры расчета.....	25
3.1.3 Результаты аэродинамических расчетов .....	25
3.1.4. Анализ результатов и выводы. ....	29

3.2 Расчетное определение аэродинамических коэффициентов на копер ствола СКС-1 рудника.....	31
3.2.1 Общие сведения .....	31
3.2.1.1 Краткая характеристика комплекса сооружений ствола СКС-1 рудника.....	31
3.2.1.3 Ветровые режимы зоны строительства .....	33
3.2.2 Разработка расчетной модели.....	33
3.2.2.1 Геометрическая модель комплекса сооружений .....	33
3.2.2.2 Расчётная сетка.....	34
3.2.2.3 Граничные условия .....	35
3.2.2.4 Параметры расчётов.....	36
3.2.3 Результаты аэродинамических расчетов .....	36
3.2.4. Анализ результатов и выводы. ....	39
3.3 Расчетное определение средних и пульсационных составляющих ветровых нагрузок на несущие конструкции одиночной ВЭУ с фиксированными лопастями.....	41
3.3.1 Общие сведения .....	41
3.3.1.2 Краткая характеристика конструкций ВЭУ .....	41
3.3.1.3 Ветровые режимы и зоны строительства .....	42
3.3.2 Разработка и верификация расчётной модели .....	43
3.3.2.1 Геометрические модели ВЭУ .....	43
3.3.2.2 Расчетные сетки .....	44
3.3.2.4 Граничные и начальные условия.....	46
3.3.2.5 Параметры расчета.....	47
3.3.3 Результаты аэродинамических расчетов .....	47
3.3.4 Анализ и обобщение результатов.....	49
Библиография.....	51

## **Предисловие**

### Сведения о Пособии

1. Исполнитель – ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО» (ЗАО НИЦ СтаДиО)
2. Внесен ....
3. Подготовлен ...
4. Утвержден ...
5. Зарегистрирован ...

В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего Пособия соответствующее уведомление будет опубликовано в установленном порядке. Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования- на официальном сайте разработчика (Минстрой России) в сети Интернет

## **Введение**

Настоящее Пособие разработано в развитие свода правил СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» в части раздела 11 «Воздействия ветра».

В Пособии представлены теоретические основы математического (численного) моделирования ветровых нагрузок (основной и пиковой) и параметров пешеходной комфортности, а также требования к расчетной модели, схема (порядок) расчетных 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).

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

## 1.1 Область применения

Рекомендации настоящего Пособия распространяются на здания и сооружения сложных форм, 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, учет при надлежащем обосновании других направлений ветрового потока или составляющих общего сопротивления тела по другим направлениям, необходимость учета влияния близстоящих зданий и сооружений, рельефа местности и т.п.).

## 1.2 Нормативные ссылки

В настоящем Пособии использованы нормативные ссылки на следующие документы:

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

СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия (с изменениями N 2)

*Примечание:* При пользовании настоящим Пособием целесообразно проверить действие ссылочных документов в информационной системе общего пользования – на официальном сайте федерального органа исполнительной власти в сфере стандартизации в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный документ, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого документа с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого документа с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего свода правил в ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку. Сведения о действии сводов правил целесообразно проверить в Федеральном информационном фонде стандартов.

## 1.3 Термины и определения

**1.3.1. Геометрическая модель** – замкнутая объемная модель расчетной области воздуха вокруг исследуемого Объекта.

**1.3.2. Конечнообъемная модель** – объемная сетка, аппроксимирующая расчетную область воздуха вокруг исследуемого Объекта на основе метода конечных объемов.

**1.3.3. Расчетная модель** – конечнообъемная модель с заданными граничными и начальными условиями, свойствами воздуха и другими необходимыми в конкретной задаче параметрами.

**1.3.4. Модель турбулентности** – математическая модель, используемая для моделирования эффектов турбулентности.

Наиболее употребительные/адекватные модели турбулентности:  
LES - Large Eddy Simulation (Моделирование Крупных Вихрей);  
RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes (Осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса);

DES - Detached Eddy Simulation (Моделирование Отсоединенных Вихрей): является комбинацией LES и RANS.

**1.3.5. Огибающие пикового ветрового давления** – максимальные (минимальные) значения пикового ветрового давления среди всех направлений ветра в каждой точке поверхности здания или сооружения.

**1.3.6. Математическое моделирование** – это технология обработки информации об интересующих нас объектах, предусматривающая изучение и прогнозирование их проявлений с использованием возможностей математики.

**1.3.7. Математическая модель** представляет собой основные закономерности и связи, присущие изучаемому явлению и выраженные в виде формул, уравнений, наборов правил или соглашений, записанных в математической форме. Математические модели являются одним из основных инструментов познания человеком явлений окружающего мира.

**1.3.8. 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.

**1.3.9. Верификация ПС** – это обоснование возможности использования ПС, а также реализуемых в ПС моделей и методов в заявленной области применения, выявление погрешности оценки параметров моделируемых объектов путем сравнения результатов с экспериментальными данными, расчетными данными, полученными по другим 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 расчета тем моделям, которые положены в основу разработки

**1.3.10. Пограничный слой** – тонкий слой газа над поверхностью обтекаемого тела, в котором проявляются эффекты вязкости.

**1.3.11. Начальные условия** – это такие условия, которым должно удовлетворять решение системы уравнений сплошной среды в начальный момент времени ( $t=0$ ) во всех точках пространства, занятого сплошной средой.

**1.3.12. Граничные условия** – это условия, которые должны выполняться на границах сплошной среды в любой момент времени при ее движении.

**1.3.13. Метод конечных объемов** – численный метод решения задач сплошных сред, основанный на использовании интегральной формулировки законов сохранения. По сути, расчетная область с помощью сетки разбивается на совокупность контрольных объемов. Узлы, в которых ищется решение, в частности, могут находиться в центрах указанных объемов. Для каждого объема должны выполняться законы сохранения массы, количества движения и энергии.

## 1.4 Общие требования

1.4.1. При определении ветрового нагружения проектируемых зданий, сооружений и комплексов необходимо руководствоваться разделом 11 СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия».

Согласно пп.11.1.7 СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85\* (с изменениями N 2), 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, учет при надлежащем обосновании других направлений ветрового потока или составляющих общего сопротивления тела по другим направлениям, необходимость учета влияния близстоящих зданий и сооружений, рельефа местности и аналогичные случаи), аэродинамические коэффициенты устанавливаются в рекомендациях, разработанных с учетом 4.7 на основе результатов:

1) физического (экспериментального) моделирования - испытаний в аэродинамических трубах (см. приложения Ж и И); 2) математического (численного) моделирования ветровой аэродинамики на основе численных схем решения трехмерных уравнений движения жидкости и газа с адекватными моделями турбулентности, реализованных в современных верифицированных лицензионных программных комплексах вычислительной гидрогазодинамики. (в ред. Изменения N 2, утв. Приказом Минстроя России от 28.01.2019 N 49/пр)

Для сооружений повышенного уровня ответственности, имеющих уникальную архитектурную форму и конструктивные решения, а также в случаях, не предусмотренных пунктом Д.1 приложения Д СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия», определение ветровых нагрузок необходимо выполнять с использованием более точных методик, таких как численное моделирование и экспериментальное моделирование на основе продувок в специализированных аэродинамических трубах (АДТ), позволяющих воспроизвести атмосферный пограничный слой.

1.4.2. При определении ветрового нагружения необходимо учитывать:

- объемно-планировочные, архитектурные и конструктивные решения проектируемых зданий, сооружений и комплексов;
- характер локального рельефа местности;
- влияние близкорасположенных зданий (окружающую застройку);
- метеорологическую информацию в районе строительства.

1.4.3. При проектировании зданий, сооружений и комплексов необходимо определять:

1.4.3.1. Ветровые нагрузки на несущие конструкции:

- средняя и динамическая (амплитуда или полуразмах) составляющие суммарных расчетных ветровых нагрузок на несущие конструкции в осях здания, либо в осях ветра (например,  $F_X$  – сила лобового сопротивления,  $F_Y$  – сила поперек потока ветра, векторная сумма нагрузки ( $F_R$ ) и крутящий момент относительно центральной оси здания ( $M_Z$ )) для нескольких направлений ветра (рекомендуемое количество – 24 направления ветра, шаг по углу  $15^\circ$ );

- средняя ( $f$ ), динамическая (амплитуда или полуразмах,  $f_{dyn}$ ) составляющие погонной силы и коэффициент «динамичности» ( $k_{dyn} = f_{dyn}/f$ )

для соответствующей компоненты (поверхность сбора аэродинамической нагрузки в уровне перекрытия) каждого этажа здания / сооружения.

#### 1.4.3.2. Ветровые нагрузки на фасадные / ограждающие конструкции:

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

– огибающие вычисленных поэтажно максимальных и минимальных значений ветрового давления на фасадные конструкции; изополя 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 расчетных величин ветрового давления на фасадные / ограждающие конструкции для наиболее опасных направлений ветра.

#### 1.4.3.3. Ветровые воздействия в пешеходных зонах (оценка пешеходной комфортности):

– расчетные 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 трем нормативно регламентированным критериям.

#### 1.4.3.4. 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:

– резонансное вихревое возбуждение;

– галомирование и галомирование 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 жесткости);

– флаттер (для рекламных щитов, установленных на зданиях и сооружениях, а также для навесных фасадных конструкций).

При проектировании зданий, сооружений и комплексов должны использоваться такие конструктивные решения, которые исключают возбуждение аэродинамически неустойчивых колебаний и удовлетворяют условиям динамической комфортности пребывания в них людей (МГСН 4.19-05, приложение П.6.1).

#### 1.4.3.5. Уровень комфортности пребывания на верхних этажах здания посетителей, сотрудников и обслуживающего персонала при действии ветровой нагрузки:

– расчетные ускорения перекрытий зданий от ветровой нагрузки.



## 2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЗДАНИЯ, СООРУЖЕНИЯ И КОМПЛЕКСЫ.

### 2.1 Теоретические основы математического (численного) моделирования ветровых нагрузок и воздействий.

Расчеты ветровых потоков и воздействий сводятся к численному решению трехмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики в постановке Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{-\partial p}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} &= \frac{-\partial p}{\partial y} + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} &= \frac{-\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \quad (2.1)$$

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

$$\rho = const \quad (2.3)$$

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

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

Прямое решение уравнений (2.1) - (2.3) с учетом 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 подходов к моделированию турбулентности:

– 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;

– Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS (Осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса): в основе этого метода лежит полуэмпирический подход, основанный на разложении скорости на осредненную во времени и пульсационную составляющие. 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 отсоединенных вихрей): этот подход является комбинацией LES и RANS. Он заключается в том, что «отсоединенные» энергонесущие вихри, населяющие отрывные зоны, рассчитываются «точно» методом LES, а области присоединенных пограничных слоев описываются RANS моделями.

Для решения практических наукоемких инженерных задач в современной расчетной практике доминирует полуэмпирический подход, основанный на разложении скорости на осредненную во времени и пульсационную составляющие  $u_i(t) = \bar{u}_i + u'_i(t)$  и переходе к решению так называемых «осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса» (Reynolds averaged Navier-Stokes Method, RANS):

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \dots, \frac{\partial u'_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2.4)$$

где  $\bar{p}$  – средние давления, 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 осредненного движения  $(\bar{u}_i, \bar{p})$  и аппроксимируются, как правило, по гипотезе Буссинеска:

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = -\mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.5)$$

где  $\mu_t$  – дополнительная вязкость, вызванная пульсациями;  $k$  – осредненная энергия турбулентных пульсаций (ТКЕ). Система является незамкнутой и требует дополнительных соглашений («моделей турбулентности»).

Решение уравнений (2.4) может проводиться как в стационарной, так и в нестационарной постановке. Стационарная задача сводится к итерационному решению редкозаполненной системы линейных алгебраических уравнений, с узловыми давлениями, компонентами скоростей и мерами локальной турбулентности (в частности, ТКЕ) в качестве неизвестных.

## 2.2. Требования к расчетной модели

### 2.2.1. Размеры расчетной области

Для расчетной области в форме параллелепипеда боковая граница должна быть расположена на расстояние не менее  $5H$  от центра застройки (где  $H$  – размер 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 расчетной области) – не менее  $5H$ .

Для расчетной области в форме цилиндра радиус составляет 1-3 км или не менее  $10H$ .

### 2.2.2. Граничные условия

В качестве характеристик набегающего потока (граничные условия на «входе» (INLET)) задаются профили скорости ветра и характеристик турбулентности (кинетическая энергия турбулентности и энергии диссипации, интенсивность турбулентности и масштаб вихря), соответствующие расчетным значениям нагрузок с учетом коэффициента надежности по нагрузке 1.4 и отвечающие заданным ветровым районам и типам местности по СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия». 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 границе области задается условие симметрии потока.

На нижней границе области и на всех зданиях / сооружениях задается условие «стенки с прилипанием» (No-Slip Wall,  $U = V = W = 0$  м/с), исключающее проникновение вещества через поверхность.

На стенках возможно задание эквивалентной шероховатости. Но для учета шероховатости стенок рекомендуется вместо подбора пристеночных функций или коррекции их стандартных параметров применять по возможности «натуральное» моделирование (учет в модели рельефа местности, балконов и оконных проемов и т.п.).

### 2.2.3. Начальные условия

В качестве начальных условий во всем домене 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 расчетов в стационарной постановке.

### 2.2.4. Геометрическая модель

2.2.4.1. Объемная геометрическая модель здания, сооружения или комплекса выполняется согласно исходным данным – архитектурным и конструктивным чертежам. При создании трехмерной (3D) геометрической модели объекта детализация выбирается в соответствии с поставленной задачей:

– максимально подробная детализация при создании геометрии здания / сооружения, воспроизведение реальной формы фасадов (балконов, оконных проемов, 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.

2.2.4.2. При моделировании реальной застройки рассматривается близлежащая территория радиусом 1-3 км. Окружающая застройка моделируется упрощенно 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).

2.2.4.3. Расчетный воздушный домен формируется следующим образом: после создания объемных геометрических моделей исследуемого объекта и окружающей застройки:

– геометрические объемы целевого здания / сооружения и застройки «вычитаются» из модели воздушного пространства (в форме параллелепипеда или цилиндра);

– либо из модели воздушного пространства (в форме параллелепипеда или цилиндра) «вычитается» только геометрический объем только целевого здания / сооружения (в том случае если окружающая застройка моделируется «методом погруженных границ»).

#### 2.2.5. Пространственная дискретизация модели (расчетная сетка)

Наиболее эффективным в настоящее время признан «метод конечных объемов» (МКО), не требующий столь детального моделирования пограничного слоя, как метод конечных элементов (МКЭ), и более удобный при описании сложных расчетных областей реальных застроек, чем метод конечных разностей.

Перед проведением основных аэродинамических расчетов здания/сооружения с учетом окружающей застройки на модели здания / сооружения «в чистом поле» необходимо проводить серию верификационных и валидационных расчетных исследований (проверка сеточной сходимости) с целью выбора оптимальных параметров расчетной сетки непосредственно на поверхности и вблизи исследуемого объекта. Рекомендуемая начальная величина поверхностной сетки на целевом объекте не должна превышать характерные размеры фасадных конструкций (~1 м). Количество расчетных случаев (количество сгущений сетки) должно быть не менее 3.

Для расчетных геометрически сложных реальных моделей зданий и городских застроек в созданном расчетном домене создается неструктурированная сетка из тетраэдров и назначаются узловые компоненты (для удобства дальнейшего присвоения граничных условий).

Рекомендуемые параметры расчетных сеток для проведения основных аэродинамических расчетных исследований следующие. Размеры элементов сетки на поверхности целевого объекта принимаются 0.5 м, в ближней зоне целевого объекта (в радиусе ~0.5 км) размеры элементов на поверхностях соседних зданий / сооружений достигают 4 м, на достаточном удалении от здания размеры на поверхностях зданий / сооружений окружающей застройки достигают 10 м. На поверхности земли и приземном воздушном слое (высотой ~4 м от земли) характерный размер элементов – 1.5 м, в случае оценки пешеходной комфортности приземный воздушный слой выбирается высотой ~2 м от земли с характерным размером элементов – 0,3 м. Максимальный размер элемента в расчетной области достигает 16 м (в радиусе 500-1000 м, выше 150 м).

#### 2.2.7. Параметры численных расчетов

Физическое время счета для нестационарных расчетов выбирается так, чтобы поток прошел всю расчетную область не менее 3 раз.

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

$$C_0 = \frac{U_{\max} \Delta t}{\Delta x_{\min}} < 3,$$

где  $\Delta x_{\min}$  – минимальный размер ячейки по потоку;  $U_{\max}$  – максимальная скорость потока).

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

Критерием сходимости и окончания счета 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.

### 2.3. Схема расчетных 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 расчетной области (см. пп. 2.2.2-2.2.3).

б) Разработка трехмерных моделей ветровой аэродинамики исследуемого объекта без учета окружающей застройки («в чистом поле»).

в) Валидация численной модели на различных расчетных сетках с разной степенью дискретизации (проверка сеточной сходимости, см. пп. 2.2.5). Выбор основных параметров сетки на поверхности исследуемого объекта, на границах и внутри расчетной области для проведения основных многовариантных расчетных исследований.

г) Разработка трехмерных моделей ветровой аэродинамики исследуемого объекта с учетом окружающей застройки.

д) Проведение аэродинамических расчетов моделей здания/сооружения «в чистом поле» и с учетом окружающей застройки в стационарной постановке для нескольких направлений ветра (рекомендуемое количество – 24 направления ветра, шаг по углу 15°).

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

- ветровые нагрузки на несущие конструкции (см. пп. 1.4.3.1.);
- ветровые нагрузки на фасадные/ограждающие конструкции (см. пп. 1.4.3.2.);
- ветровые воздействия в пешеходных зонах (оценка пешеходной комфортности) (см. пп.1.4.3.3.);
- возможность возникновения аэроупругой неустойчивости зданий, сооружений и их отдельных конструктивных элементов типа галопирование, галопирование в спутной струе и дивергенция (см. пп. 1.4.3.4);
- уровень комфортности пребывания на верхних этажах здания посетителей, сотрудников и обслуживающего персонала при действии ветровой нагрузки (см. пп. 1.4.3.5).

Средние расчетные ветровые давления вычисляются в результате стационарных расчетов, динамическая составляющая, максимальные и минимальные давления вычисляются по методике, представленной в пп. 2.1.

а) В результате анализа полученных результатов многовариантных аэродинамических расчетов в стационарной постановке определяются наиболее опасные направления ветра с точки зрения реализации максимальных нагрузок на несущие и фасадные конструкции; усиление скоростей ветра в пешеходных зонах, не удовлетворяющих критериям пешеходной комфортности; ускорений перекрытий здания/сооружения больше 0.08 м/с<sup>2</sup>; а так же возможности возникновения аэроупругих колебаний в результате ветрового воздействия.

б) Для выбранных направлений ветра выполняется расчет в нестационарной постановке. При существенном отличии средних значений может оказаться необходимым выполнить нестационарные расчеты для многих или «всех» направлений ветра.

в) По результатам выполненных аэродинамических расчетов в нестационарной постановке определяются:

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

– коэффициенты обеспеченности;

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

– уточненные ветровые воздействия в пешеходных зонах (оценка пешеходной комфортности);

– возможность возникновения аэроупругой неустойчивости зданий, сооружений и их отдельных конструктивных элементов типа вихревой резонанс и флаттер;

– уровень комфортности пребывания на верхних этажах здания посетителей, сотрудников и обслуживающего персонала при действии ветровой нагрузки.

## 2.4. Расчетная оценка пиковых величин давлений на фасадные/ограждающие конструкции

Основной характеристикой диапазона разброса экстремальных давлений на фасадные конструкции служат коэффициенты обеспеченности. Их величины определяются по результатам нестационарных расчетов по соотношениям:

$$\begin{aligned}\theta_{\max} &= (P_{\max} - P)\sigma_p \\ \theta_{\min} &= (P - P_{\min})\sigma_p\end{aligned}\quad (2.6)$$

где  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$ ,  $P$  – вычисленные значения минимумов, максимумов и среднего давлений в точке поверхности;  $\sigma_p$  – среднеквадратическое отклонение (стандарт) давлений.

Ввиду крайней трудоемкости вариантных нестационарных расчетов для минимизации их объема применяется практическая методика оценки и пиковых расчетных нагрузок на фасадные конструкции ( $P_{\max}$  и  $P_{\min}$ ) по результатам стационарных расчетов энергии турбулентных пульсаций ТКЕ с учетом осредненных коэффициентов обеспеченности  $\theta_{\max}$  и  $\theta_{\min}$ .

При этом необходимо предварительно сопоставить величины  $P$  и ТКЕ в стационарном и нестационарном расчетах. По опыту расчетов реальных конструкций средние давления воспроизводятся с практической точностью (до 5%). Кинетическая энергия пульсаций в стационарных расчетах нередко занижается, что можно «скомпенсировать» соответствующим увеличением коэффициентов обеспеченности.

Основные расчетные соотношения методики:

$$\begin{aligned}P &= \rho V^2 / 2; \\ \text{ТКЕ} &= 3/2 \cdot (I \cdot V)^2 = 3 \cdot P / \rho \cdot I^2; \\ I &= (\rho \cdot \text{ТКЕ} / |(P)| / 3)^{1/2}; \\ \sigma_p &= (I^2 + 2 \cdot I) \cdot \text{abs}(P); \\ P_{\max} &= P + \sigma_p \cdot \theta_{\max}; \\ P_{\min} &= P - \sigma_p \cdot \theta_{\min}; \\ P_{\text{пульс}} &= (P_{\max} - P_{\min}) \cdot \nu / 2,\end{aligned}\quad (2.7)$$

где  $\sigma_p$  – среднеквадратическое отклонение (стандарт) давлений  $P$ ;  $I$  – интенсивность турбулентности (стандарт пульсаций скорости);  $V$  – локальная скорость ветра;  $\nu$  – коэффициент корреляции давлений на поверхностях (для предварительных оценок по СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия» далее вычисленный в результате нестационарных расчетов).

Полученные результаты расчетных ветровых нагрузок на фасадные конструкции и распределение скоростей около исследуемого объекта могут послужить исходными данными для проведения более детального и точного исследования распределения потоков вблизи фасадных конструкций с учетом разницы температуры и затекания в воздушное пространство между стеной и навесным фасадом, что может повлечь за собой в равной степени как увеличение, так и понижение расчетных ветровых нагрузок на фасады.



## 2.5. Расчетная оценка пешеходной комфортности

Расчетная оценка пешеходной комфортности выполняется следующим образом. После проведения расчетов для «всех» направлений ветра (как правило, 16-ти или 24-х румбов) результаты обрабатываются с использованием специального компьютерного модуля. Значения усилений в характерных точках застройки суммируются с весовыми коэффициентами, соответствующими частоте возникновения ветрового воздействия данного направления и данного диапазона скоростей. В качестве расчетной высоты принимается 1.5 м.

После проведения численного моделирования для «всех» направлений ветра (как правило,  $j = 1, 2, \dots, 24$ ) «время дискомфорта  $l$ -го уровня»  $K_{\text{crl}}$ ,  $l = 1, 2, 3$  для представительного набора точек пешеходных зон определяется соотношениями:

$$K_{\text{crl}} = \sum S_{ij} T_{ij};$$
$$V_{ij} = V_i / V_{10} (V_j + \theta \cdot I), \quad (2.8)$$

где  $V_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  – скорости в таблице метеоданных («розе ветров»);  $T_{ij}$  – продолжительность (по метеоданным, часов в год) ветрового воздействия направления  $j$  и средней скорости  $V_i$ ;  $V_j$  – средняя скорость ветра в данной точке согласно расчету для направления  $j$  при скорости  $V_{10}$  на высоте 10 метров;  $V_{ij}$  – максимальная скорость в точке в порывах при скорости ветра  $V_i$ ;  $\theta$  – коэффициент обеспеченности по заданию на расчет (обычно в диапазоне от 1 до 3);  $S_{ij}$  – признак (0 или 1) превышения локальной скоростью ветра в точке  $V_{ij}$  критического значения  $V_{\text{crl}}$  для данного уровня комфорта  $l$ ;  $I$  – интенсивность турбулентности (стандарт пульсаций скорости);  $P = \rho V^2 / 2$  – среднее давление;  $\text{ТКЕ} = 3/2 \cdot$  – энергия турбулентных пульсаций.

Роза ветров принимается по метеоданным. Для оценки распределения ветра по скоростям внутри румба на практике, как правило, применяется распределение Вейбулла:

$$f(u) = (k/c) \cdot (u/c)^{k-1} \exp[-(u/c)^k] \quad (2.9)$$

Значения параметров  $c$  и  $k$  определяются на этапе аппроксимации конкретных данных метеонаблюдений. Параметр формы  $k$  можно определить с помощью графика интегральной повторяемости скорости ветра, построенного в логарифмических координатах. На оси абсцисс откладывается интегральная повторяемость скорости ветра в % от общего числа случаев наблюдений, а по оси ординат – значение скорости ветра в м/с. Нанесение экспериментальных данных на такой график дает, как правило, линейную зависимость. Котангенс угла наклона прямой линии к оси абсцисс дает значение параметра  $k$ .

Наилучшее соответствие экспериментальным данным получается при значениях параметра  $k = 1.8 - 2.3$  и параметра  $c$ , близкого к значению средней скорости ветра.

Оценка среднеквадратического отклонения (стандарта) пульсационной составляющей скорости проводится по результатам стационарного расчета

энергии турбулентных пульсаций ТКЕ и с учетом коэффициента обеспеченности  $\theta = 2$ .

$$\sigma = \sqrt{2/1.5 \cdot \text{ТКЕ}}. \quad (2.10)$$

Скорость ветра с учетом порывов ( $V_{ij}$  в формуле выше) определяется с использованием средней скорости  $V_m$  по формуле

$$V_{\max} = V_m + \sigma\theta. \quad (2.10)$$

Проведение для оценки пешеходной комфортности задачи нестационарных расчетов целесообразно только после проведения натурных замеров скоростей ветра и пульсаций непосредственно на площадке строительства.

## **2.6. Программная реализация численной методики определения ветровых воздействий**

Рассмотренные выше математические и численные подходы моделирования задач гидрогазодинамики, как правило, реализованы в исследовательских (в т.ч., с открытым исходным кодом) и коммерческих программных продуктах (программных комплексах (ПК)), таких как ANSYS CFD (CFX, Fluent), SIMULIA Abaqus, LS-DYNA, Dytran, Star-CCM, Flow Vision, OpenFOAM.

Функционально ПК состоит из трех относительно независимых модулей (препроцессора, решателя и постпроцессора):

- задачей препроцессора является импортирование расчетной сетки, задание типа решаемой проблемы, назначение среды моделирования и расстановка начальных и граничных условий;
- «решатель» обладает рядом особенностей, позволяющих гибко и эффективно организовывать процесс расчета; в некоторых ПК имеется возможность проведения параллельных вычислений;
- постпроцессор поддерживает необходимые функции по анализу, обработке и визуализации информации, возможно создание графиков, изополей, эпюр и анимаций.

С точки зрения проведения большого объема многовариантных расчетов (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.

### **3. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧИСЛЕННОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕТРОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ И КОМПЛЕКСОВ**

#### **3.1 Расчетное определение ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции и параметров пешеходной комфортности многофункционального жилого комплекса**

##### **3.1.1 Общие сведения**

В приведенном расчетном исследовании выполнено следующее:

- анализ ветровых режимов района строительства, сложившейся застройки и конструктивно-архитектурных особенностей многоэтажных зданий многофункционального жилого комплекса, особенности расчетов ветрового нагружения зданий и комплексов в отечественных и зарубежных нормативных документах.

- разработаны и верифицированы расчетные трехмерные CFD-модели, включающие рассматриваемый многофункциональный жилой комплекс (далее 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 трехмерной постановке для МЖК в окружающей застройке.

- определены пиковые (минимальных и максимальных) давления на фасадные конструкции для 24-х направлений ветра (через 15°) в трехмерной постановке для МЖК в окружающей застройке: расчетные значения "огибающих" максимального и минимального значений ветрового давления на фасадные конструкции; огибающие вычисленных поэтажно максимальных и минимальных значений ветрового давления на фасадные конструкции; изополя 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 на высоте 1.5 м и 6.9 м (оценка пешеходной комфортности): расчетные поля коэффициентов усиления скоростей ветра; уровни пешеходной комфортности по 3-м нормативно регламентированным критериям.

##### **3.1.1.1 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, нижний уровень которой занимает автостоянка, технические помещения и блок загрузки,

а на верхнем предусмотрены объекты общественного назначения. Входы в жилые секции расположены на уровне земли без ступеней и пандусов.

Максимальная высота МЖК не превышает 100,00 м от отметки  $\pm 0.000$ . В соответствии с ч.2 ст.48.1 Федерального закона от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ «Градостроительный кодекс Российской Федерации» МЖК является уникальным объектом с заглублением подземной части более 15 метров.



Рисунок 3.1.1 - Схема фасада ЖК в разрезе 1-1

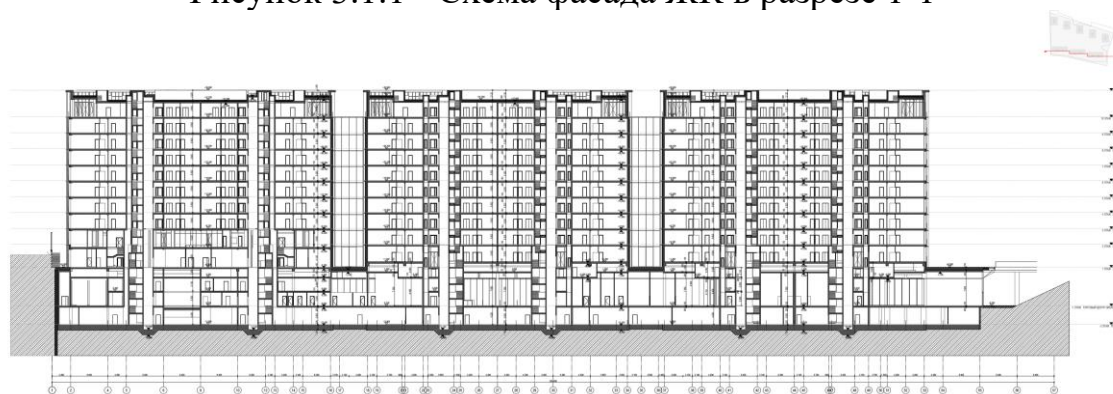


Рисунок 3.1.2 - Схема фасада ЖК в разрезе 2-2 и 5-5

### 3.1.1.2 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.

Минимальное расстояние от железнодорожных путей до ограждающих конструкций ближайшего проектируемого здания составляет 51 метров. Железнодорожные пути проходят в выемке по отношению к участку проектирования (перепад высоты до 11 метров); частично вдоль границы участка пролегает ров (водоотводная канава).

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  $\sim 0.2$  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 упрощенно по фотографиям и информации из Интернета (ресурсы [openstreetmap.org](http://openstreetmap.org), [yandex.ru](http://yandex.ru), [google.com](http://google.com), [wikimapia.org](http://wikimapia.org), [gdeetotdom.ru](http://gdeetotdom.ru) и др.). Для справки приводятся характерные виды (рис.3.1.3).

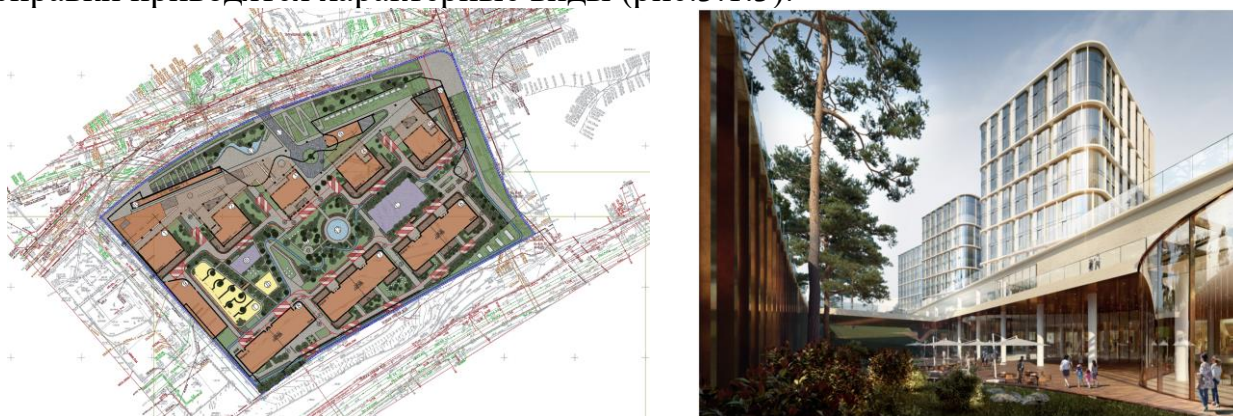


Рисунок 3.1.3 – Слева -схема планировочной организации земельного участка; справа - рендер проекта

### 3.1.1.3 Ветровые режимы зоны строительства

Для оценки ветровых нагрузок необходимо применение метеорологии, микрометеорологии и климатологии. Метеорология дает 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, проведенные обсерваторией Михельсона (в период с 1966 по 1998 гг.).

В расчетах ветровых нагрузок на МЖК принят первый ветровой район (согласно СП), 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. Расчетное ветровое давление с учетом коэффициента надежности по нагрузке 1.4, и с учетом коэффициента для типа местности  $k(z_e=10 \text{ м})=0.65$ , равняется 209.3 Па, соответствует скорости ветра на высоте 10 м над землей 18.3 м/с.

### 3.1.2 Разработка расчетной модели

3.1.2.1 Геометрическая модель комплекса жилых зданий в окружающей застройке

Практическая подготовка модели начинается с создания геометрической объемной модели сооружений и окружающей застройки (в радиусе 1.1 км). Геометрия строений жилого комплекса выполнена согласно исходным данным. При создании трехмерной (3D) геометрической модели комплекса жилых зданий максимально в программном комплексе 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 создается на основе предоставленных исходных данных (ситуационного плана) и общедоступных веб-карт ([openstreetmap.org](http://openstreetmap.org), [yandex.ru/maps](http://yandex.ru/maps), [google.com/maps](http://google.com/maps)).

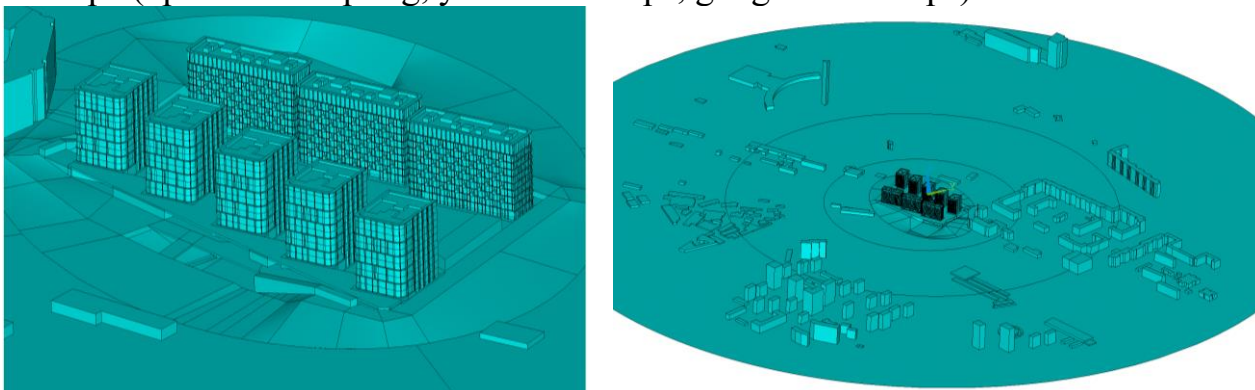


Рисунок 3.1.4 - Геометрическая модель комплекса зданий с учетом локального рельефа местности и окружающей застройки. Слева - вид с ЮВ (сверху), с СЗ (снизу); справа – изометрия

#### 3.1.2.2 Расчетная модель и сетка КО

Расчетный воздушный домен 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 полученный расчетный домен разбивается на конечные объемы.

В ближайшей зоне для сгущения сетки около каждого из строений комплекса был создан прямоугольный объем 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 расчетных исследований МЖК с учетом окружающей застройки размеры элементов сетки на поверхности строений многофункционального комплекса и в ближайшем прямоугольном объеме от целевого объекта с отступом от габаритов соответствующего строения 3 м составили 0.5 м. На застройке в пределах площадки строительства размер на поверхности 0.5 м, а эллипсе достигал 1.5 м. Далее в цилиндрической зоне радиусом 275 м и высотой 150 м на поверхности земли размеры элементов достигали 1.5 м, в объеме – достигали 2.5 м. В цилиндрическом объеме радиусом 550 м на поверхности застройки и земли размер элементов не превышал 3 м, размеры элементов в объеме достигали 9 м. В цилиндрическом объеме радиусом 1100 м максимальный размер элемента на поверхности застройки и земли достигал 9 м, в объеме расчетной области до высоты 150 м – 18 м.

Общий размер *основных* расчетных конечно-объемных (КО) моделей составил ~18.0 млн. КО.

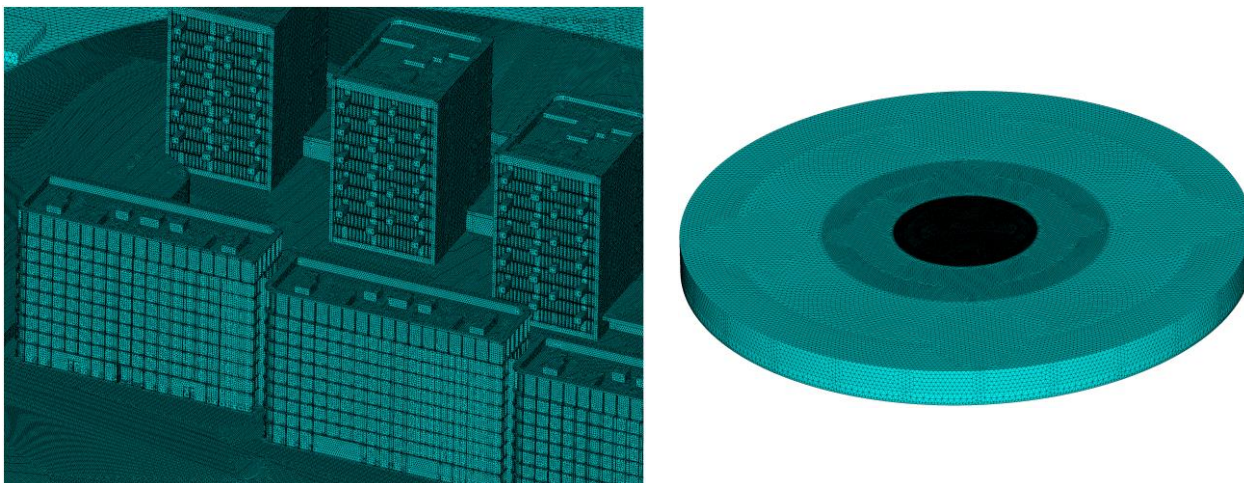


Рисунок 3.1.7 - Слева – сетка на поверхности МЖК и на близлежащих зданиях, справа – расчетная сетка вычислительного домена радиусом 1.1 км (18 041 041 улов / конечных объемов).

### 3.1.2.3 Граничные и начальные условия

Области расчета присваиваются 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 "пригород" в соответствии с данными СНиП. 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 учетом коэффициента надежности по нагрузке 1.4. Масштаб турбулентности принят равным 300 м в соответствии с рекомендациями Eurocode.

На "выходе" (*OUTLET*) и на верхней границе области потоку назначаются "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" (No-Slip Wall,  $U=V=W=0$  м/с), исключающее проникновение вещества через поверхность.

В качестве *начальных условий* во всем домене задавались нулевые скорости ( $U=V=W=0$  м/с) и нулевые дополнительные давления.

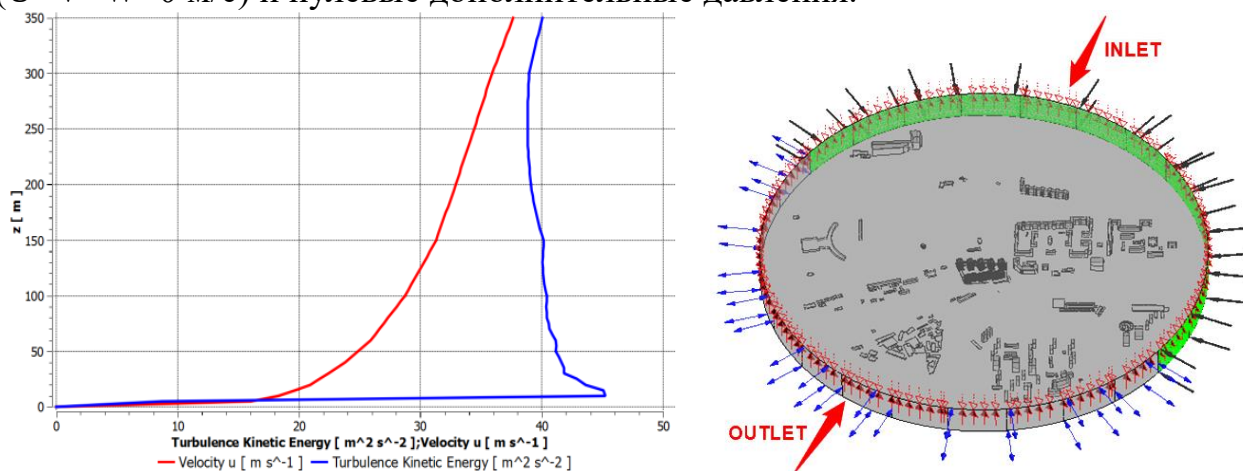


Рисунок 3.1.8 - Слева – Профили кинетической энергии турбулентности ТКЕ (синяя линия),  $\text{м}^2/\text{с}^2$ , и горизонтальной составляющей скорости ветра  $u$  (красная линия), м/с, для первого ветрового района, тип местности В («пригород»), справа – расчетная область с обозначенными граничными условиями для угла атаки ветра  $0^\circ$ .

#### 3.1.2.4 Параметры расчета

Наиболее опасные направления ветра определялись на основе выполненных трехмерных расчетных исследований в *стационарной постановке* с использованием модели турбулентности *RANS SST* при 24-х направлениях ветра (углы атаки ветра от  $0^\circ$  до  $345^\circ$  с шагом  $15^\circ$ ).

Критерием окончания счета 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 расчета. Для определения пиковых значений и пульсационной составляющей давления по опыту проведенных ранее расчетов приняты значения коэффициентов обеспеченности  $\theta_{min} = 6$  и  $\theta_{max} = 3$ . Отметим, что в отличие от гауссова распределения ( $\theta_{min} = \theta_{max} = 3$  для обеспечения вероятности 99.7%), данное распределение принято называть "скошенным". Значение коэффициента корреляции принято равным 1 (в запас).

#### 3.1.3 Результаты аэродинамических расчетов

Получены перечисленные ниже результаты многовариантных расчетных исследований по определению ветровых нагрузок на несущие и фасадные конструкции МЖК, а также результаты оценки пешеходной комфортности. Многовариантные расчетные исследования проводились с учетом рельефа и окружающей застройки – МЖК в "окружающей застройке".

Ветровые нагрузки на несущие конструкции:

- средние значения суммарных расчетных ветровых нагрузок на несущие конструкции МЖК (примеры см. рис. 3.1.9) 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  $15^\circ$ ).

- средняя ( $f$  (Н/м)), динамическая (амплитуда или полуразмах,  $f_{dyn}$  (Н/м)) составляющие погонной силы и коэффициент «динамичности» ( $k_{dyn} = f_{dyn} / f$ ) 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. рис. 3.1.10-3.1.11);

- огибающие вычисленных поэтажно максимальных и минимальных значений ветрового давления на фасадные конструкции; изополя 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. 3.1.12);

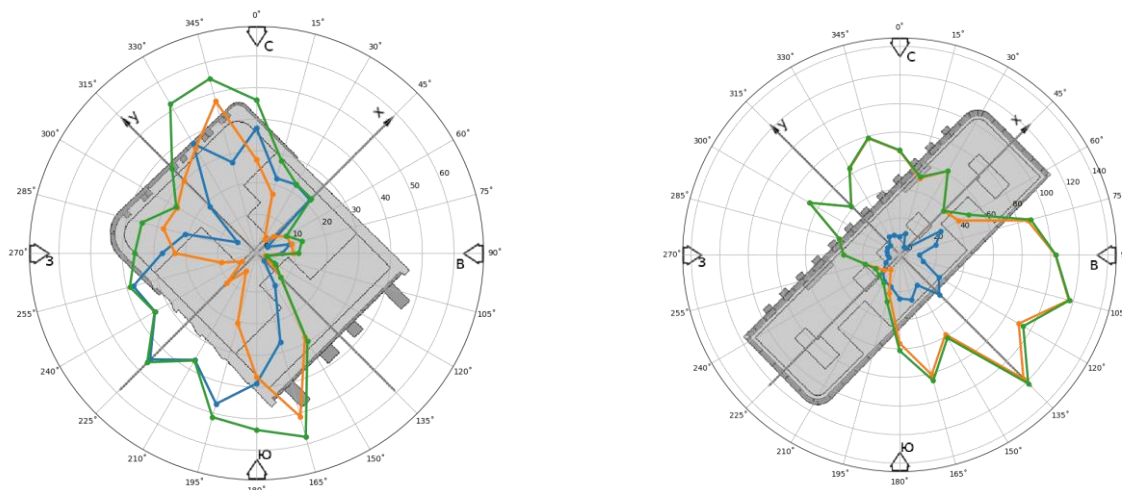


Рисунок 3.1.9 - Средние суммарные ветровые нагрузки на корпуса ЖК в зависимости от направления ветра, т.с.  $F_R$  – равнодействующая сила,  $F_X$ ,  $F_Y$  – проекции  $F_R$  на оси координат (значения приведены по модулю).

Слева – корпус 1; справа – корпус 6.

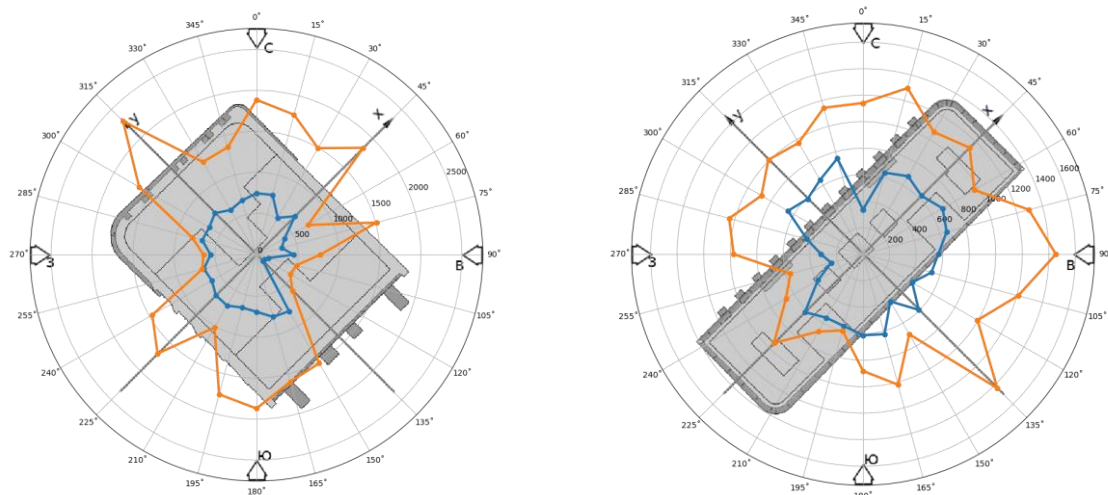


Рисунок 3.1.10 - Огибающие максимального (синяя линия) и минимального (зеленая линия) значений давления на фасады корпуса ЖК в зависимости от направления ветра, Па (значения приведены по модулю). Слева – корпус 1; справа – корпус 6.

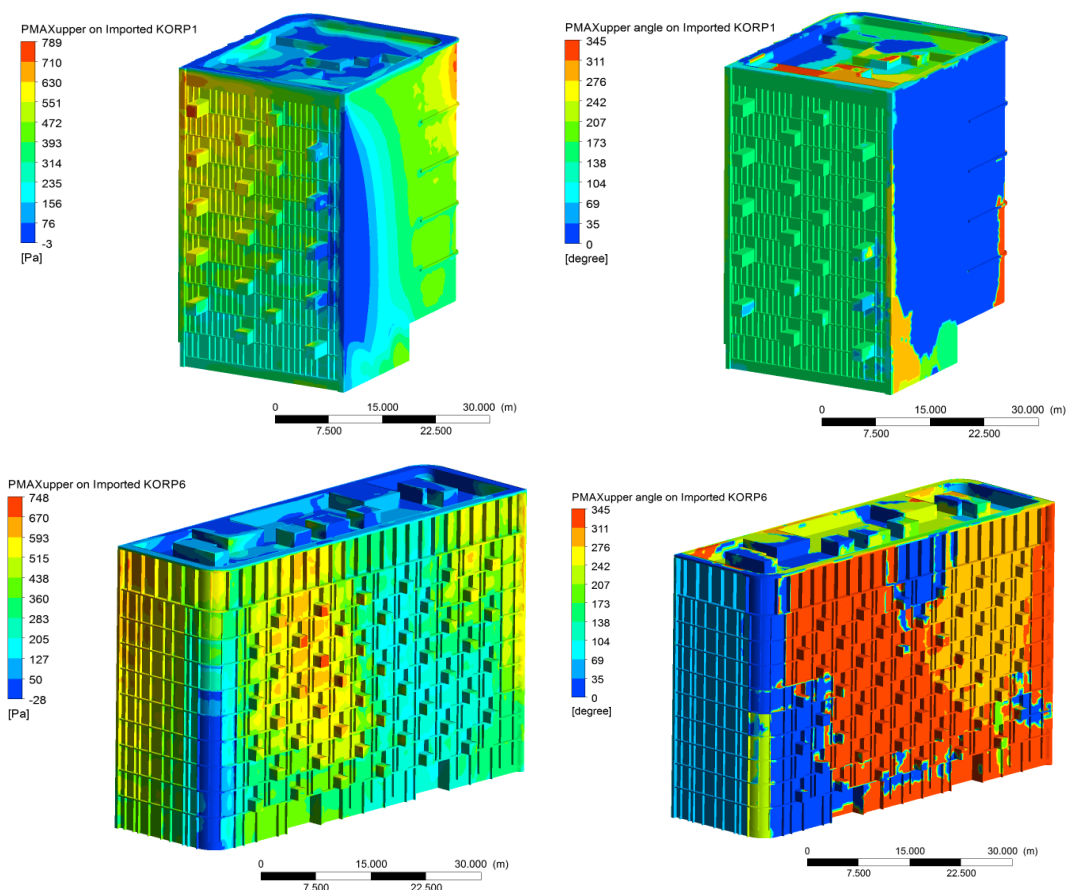


Рисунок 3.1.11 - Сверху – корпус 1 МЖК, снизу — корпус 6 МЖК. Слева – верхняя огибающая максимальных значений ветрового давления (Па) на фасадные конструкции ЖК. Справа – Углы атаки ветра (°), при которых реализуется верхняя огибающая максимальных значений ветрового давления на фасадные конструкции ЖК.

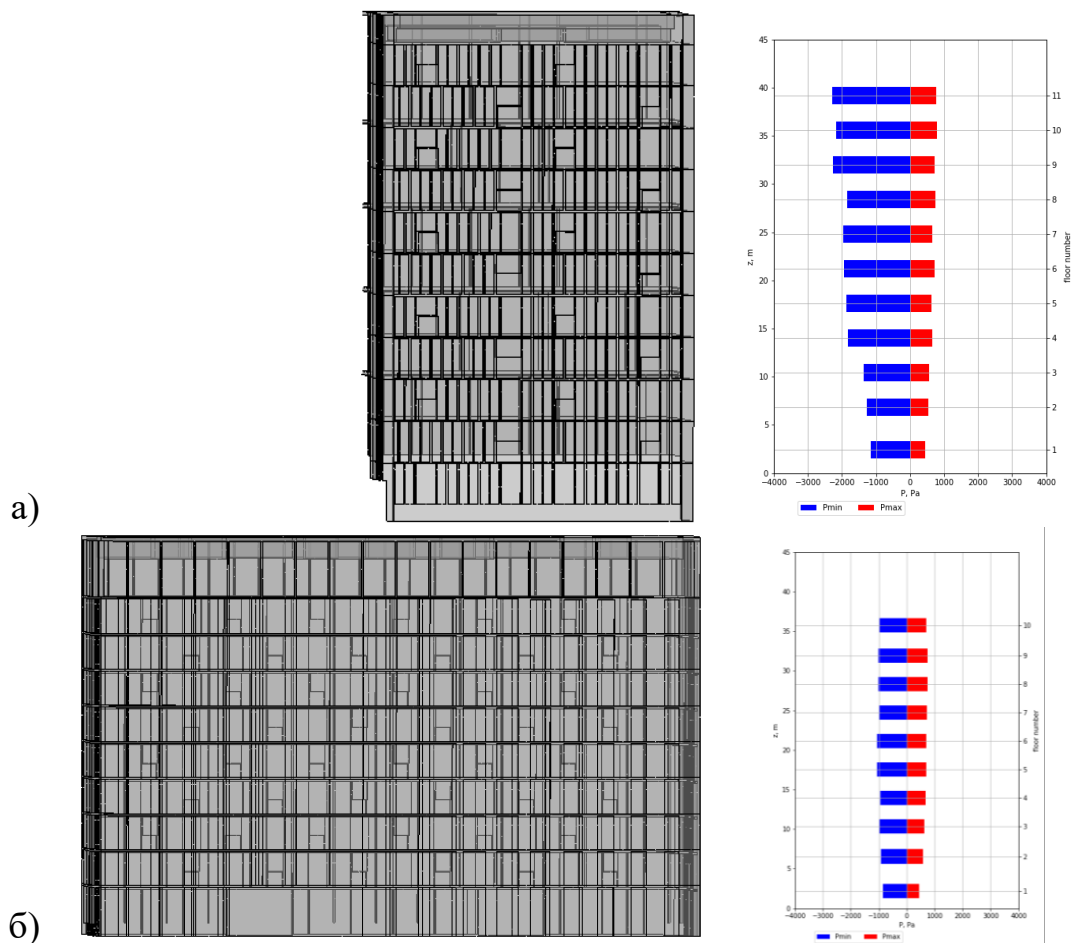


Рисунок 3.1.12 - Поэтажные огибающие минимального ( $P_{min}$ ) и максимального ( $P_{max}$ ) значений давления (Па) на фасадные конструкции МЖК с учетом всех направлений ветра. а) Корпус 1; б) Корпус 6

*Расчетная оценка пешеходной комфортности:*

- распределение скоростей ветра в порывах для пешеходных зон МЖК при 24-ти направлениях ветра (через  $15^\circ$ ) в трехмерной постановке с учетом рельефа местности и основных близкорасположенных зданий (рис.3.1.13);
- расчетные оценки уровней пешеходной комфортности по трем нормативно регламентированным критериям (рис.3.1.14-3.1.16).

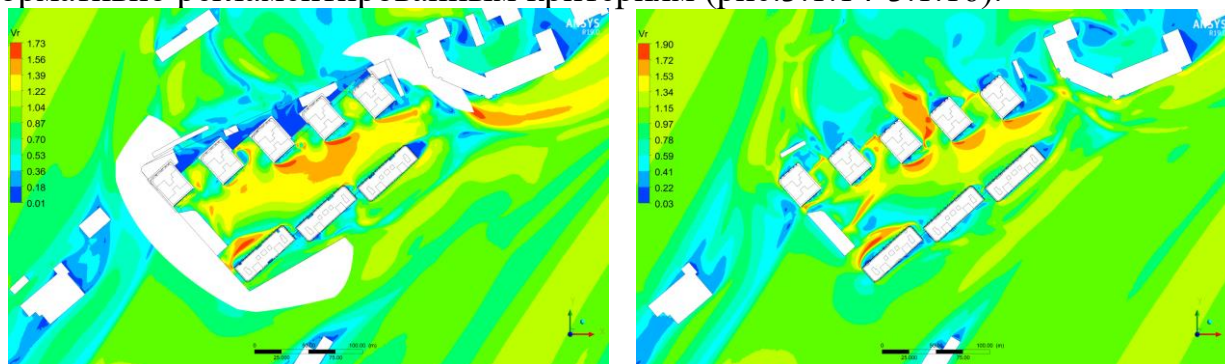


Рисунок 3.1.13 - МЖК в окружающей застройке. Коэффициенты усиления средней скорости ветра в пешеходной зоне. Угол атаки ветра  $210^\circ$   
 Слева - отметка уровня 1.5 м; справа - отметка уровня 6.9 м

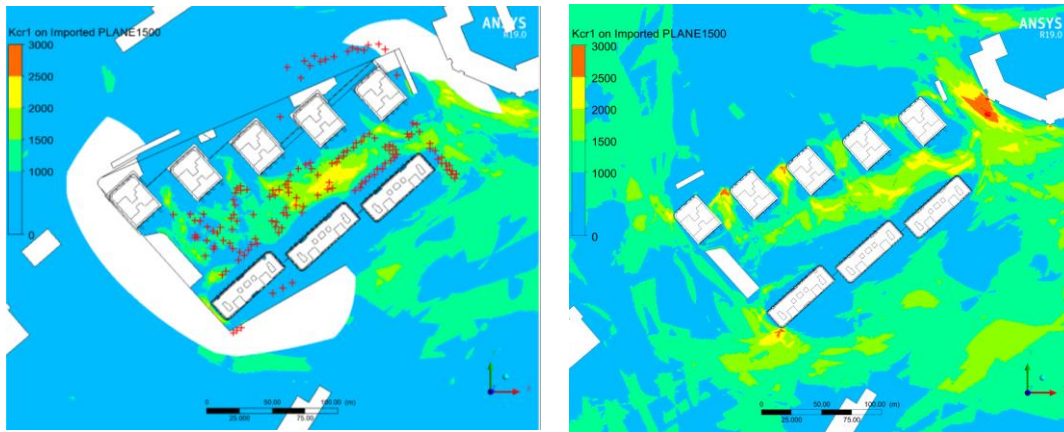


Рисунок 3.1.14 - 1-й уровень пешеходной комфортности – превышение  $V_{cr1}=6$  м/с не чаще  $K_{cr1}=1000$  часов в год в пешеходной зоне  
 Слева - отметка уровня 1.5 м; справа - отметка уровня 6.9 м

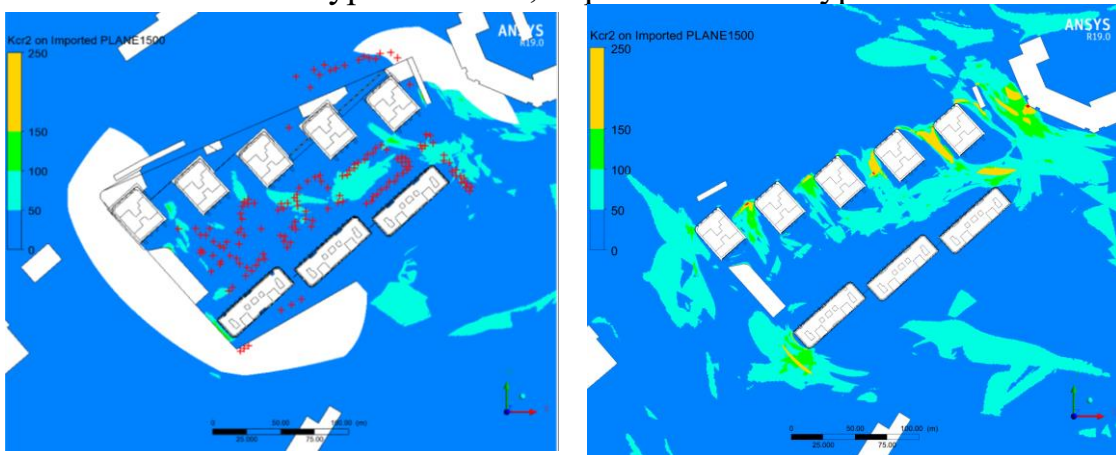


Рисунок 3.1.15 - 2-й уровень пешеходной комфортности – превышение  $V_{cr2}=12$  м/с не чаще  $K_{cr2}=50$  часов в год в пешеходной зоне  
 Слева - отметка уровня 1.5 м; справа - отметка уровня 6.9 м

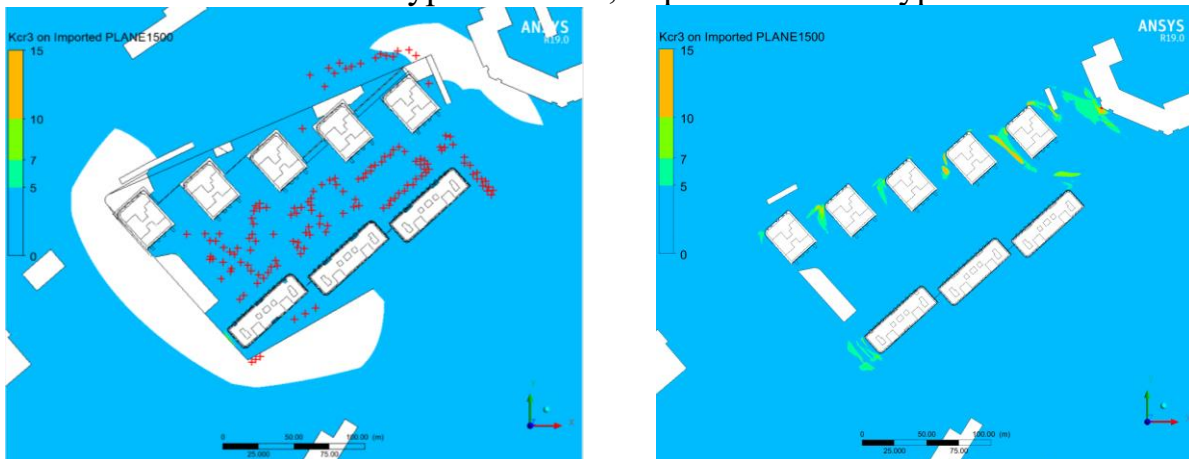


Рисунок 3.1.16 - 3-й уровень пешеходной комфортности – превышение  $V_{cr3}=20$  м/с не чаще  $K_{cr3}=5$  часов в год в пешеходной зоне  
 Слева - отметка уровня 1.5 м; справа - отметка уровня 6.9 м

### 3.1.4. Анализ результатов и выводы.

Для МЖК определены расчетные средние и пульсационные составляющие ветровых нагрузок (с учетом всех направлений ветра) на несущие конструкции МЖК. С точки зрения реализации максимальной равнодействующей

аэродинамической силы ( $F_R$ ) наиболее характерными и опасными углами атаки ветра являются: 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°.

Здания МЖК оказывают друг на друга значительное влияние с точки зрения аэродинамики. В тех случаях, когда взаимное влияние наиболее значительно, вычисленные аэродинамические коэффициенты  $C_p$  на несущие конструкции совершенно не соответствуют нормативным значениям. В тех случаях, когда взаимное влияние минимально, вычисленные аэродинамические коэффициенты  $C_p$  хорошо соответствуют 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 проведена оценка пешеходной комфортности по 3-м нормативно регламентированным критериям (по МДС [6]):

- выполнение допустимого уровня (1000 часов в год) пешеходной комфортности по первому критерию ( $V_{cr1} = 6 \text{ м/с}$ ) показано голубым цветом (рис.3.1.14). Остальные цветовые зоны соответствуют зонам превышения допустимого уровня пешеходной комфортности по первому критерию и наблюдаются во внутренней дворовой зоне между рассматриваемым зданием 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 (рис.3.1.15). Остальные цветовые зоны соответствуют зонам превышения допустимого уровня пешеходной комфортности по второму критерию и носят локальный характер во внутренней дворовой зоне между рассматриваемым зданием 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 (рис.3.1.16). 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.

## **3.2 Расчетное определение аэродинамических коэффициентов на промышленное сооружение (копер ствола рудника)**

### **3.2.1 Общие сведения**

В приведенном расчетном исследовании выполнено следующее:

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

- разработана и верифицирована трёхмерная CFD-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 (СП 20.13330.2016).

#### **3.2.1.1 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).

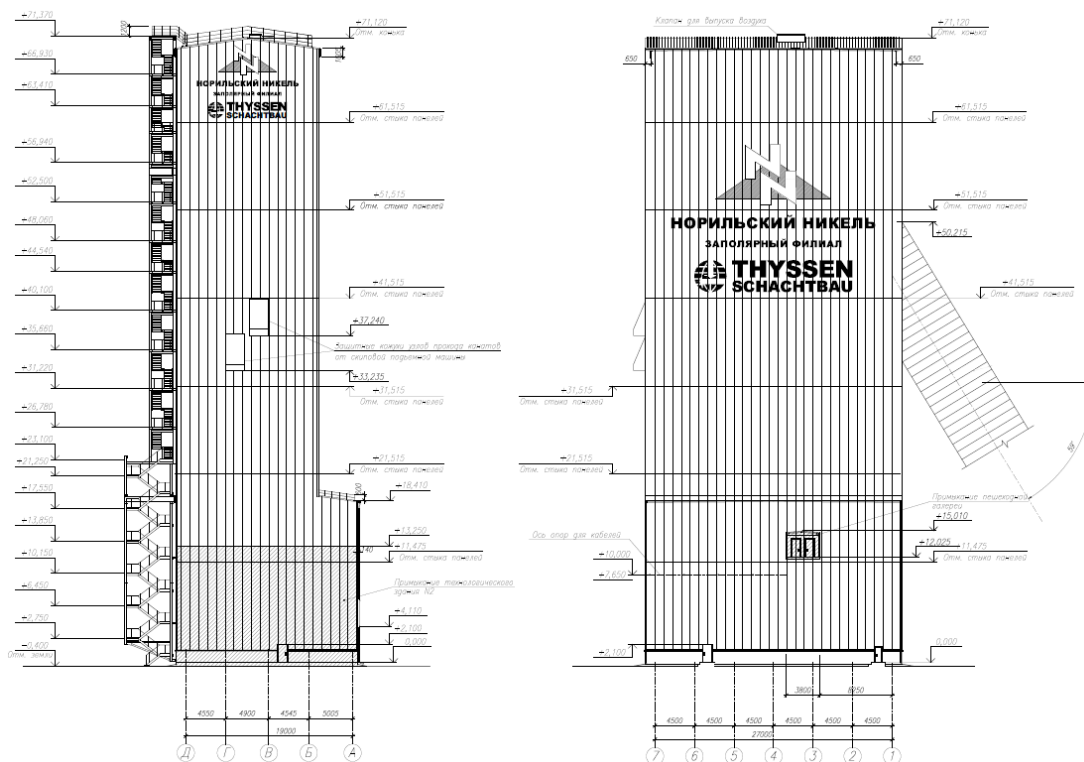


Рисунок 3.2.1 - Здание Копра СКС-1, фасады Д-А и 7-1.

### 3.2.1.2 Площадка строительства и окружающая застройка.

Участок под строительство комплекса сооружений рудника *СКС-1* располагается в Красноярском крае, вблизи г. Норильск и соответствует 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.

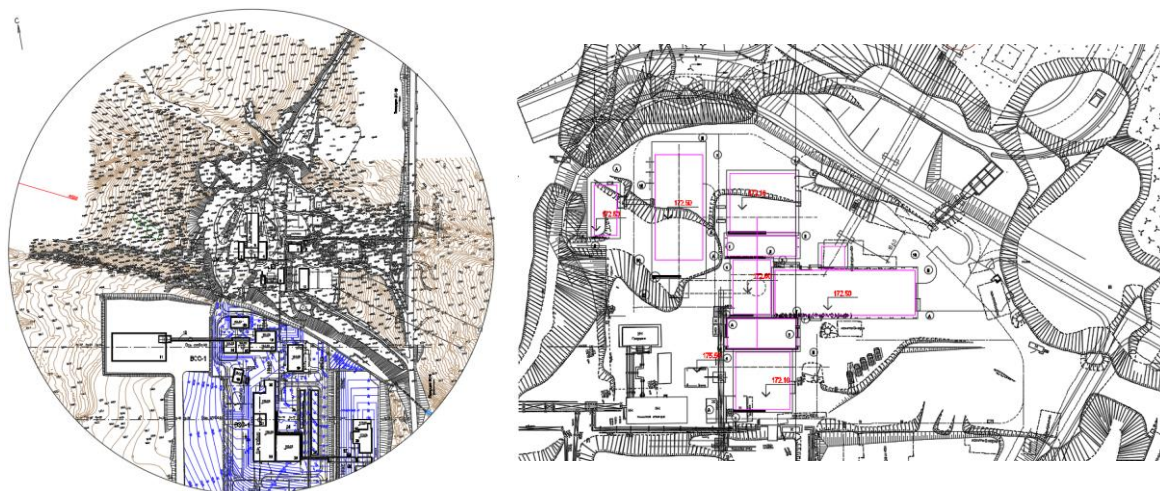


Рисунок 3.2.2 - Слева - Генеральный план участка строительства в радиусе 500 метров от *Копра СКС-1* временного периода; справа - фрагмент генерального плана участка строительства постоянного периода.



### 3.2.1.3 Ветровые режимы зоны строительства

Участок строительства находится на территории Норильского промышленного района Красноярского края. В соответствии с [3] значение нормативного давления равно 600 Па, что соответствует скорости ветра на высоте 10 м над землей 31.4 м/с. Расчетное ветровое давление с учетом коэффициента надежности по нагрузке 1.66, и с учетом коэффициента для типа местности  $k(z_e = 10 \text{ м}) = 1.00$ , равняется 1000 Па, соответствует скорости ветра на высоте 10 м над землей 40.4 м/с.

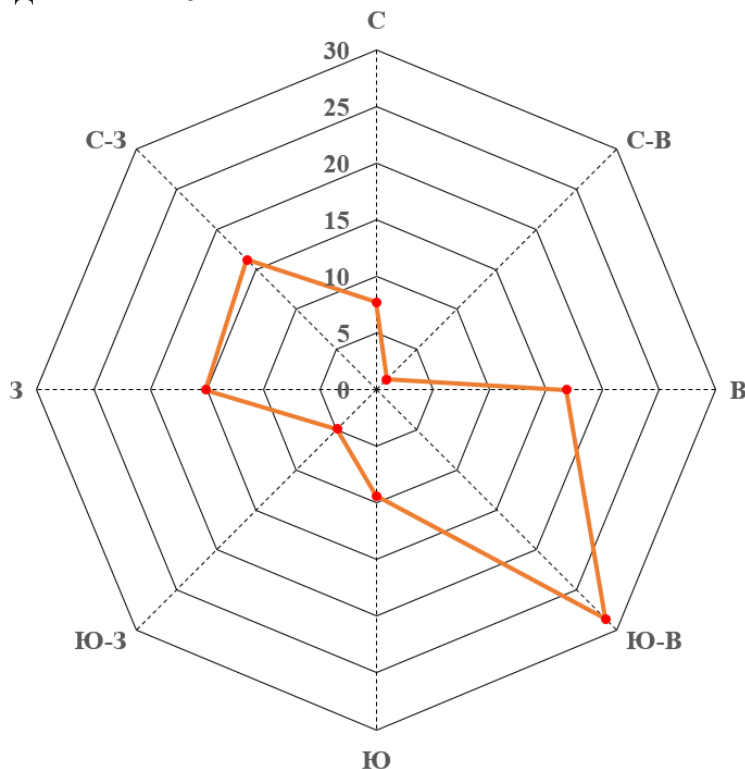


Рисунок 3.2.3 - Направление и повторяемость ветров (%) по данным <https://world-weather.ru/>.

### 3.2.2 Разработка расчетной модели

#### 3.2.2.1 Геометрическая модель комплекса сооружений

Практическая подготовка модели начинается с создания геометрической объемной модели сооружения. Геометрия исследуемых сооружений выполнена согласно исходным данным. Построенные геометрические трехмерные модели *Сооружений ствола СКС-1 рудника* показаны на рис.3.2.4

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

- Здания *ГПП, ФКУ и РТП*, т.к.:
  - представляют из себя 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.

- 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 из себя продуваемые сквозные конструкции, которые не оказывают существенного влияния на ветровые нагрузки, приходящиеся на несущие конструкции *Копра СКС-1*.

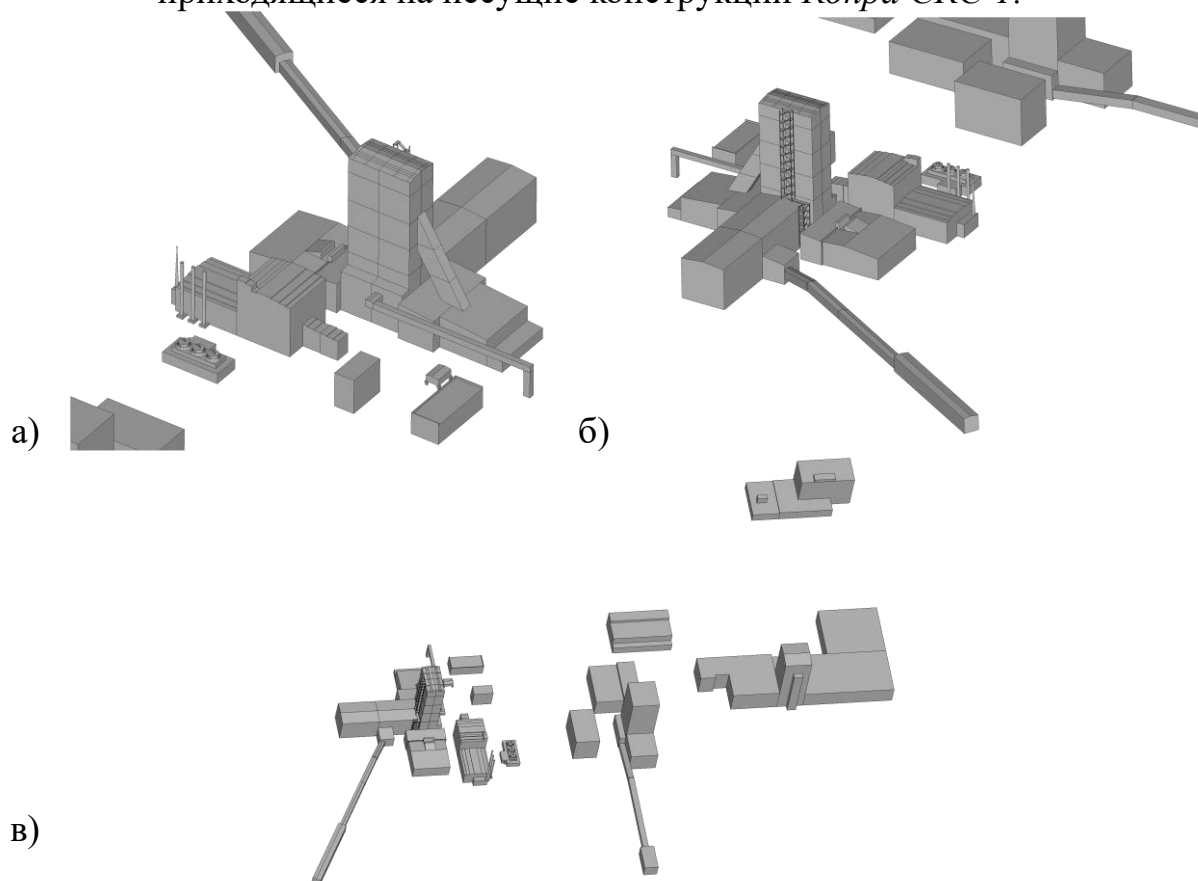


Рис.3.2.3 - Геометрическая модель сооружений  
а) вид 1; б) вид 2; в) вид 3

### 3.2.2.2 Расчётная сетка

Расчетный воздушный домен формируется следующим образом: после создания в программном комплексе объемная геометрическая модель сооружений ствола СКС-1 рудника "вычитается" из модели воздушного пространства (в форме цилиндра высотой 0.3 км, радиусом 1.0 км). Далее полученный расчетный домен разбивается на конечные.

Лестница, примыкающая к башне копра, моделировалась при помощи метода погруженного тела (Immersed Solid).

Для проведения *основных* аэродинамических расчетных исследований характерный размер элементов на поверхности сооружений и земли в радиусе 0.1 км от оси ствола принят равными 0.75 м. С удалением от целевого объекта характерный размер элементов на поверхности земли, постепенно увеличивается вплоть до 9 м, а на поверхности зданий – до вплоть 6 м. Максимальный размер

элементов в расчетной области достигает 18 м (в радиусе 555-1000 м). Общий размер *основной* расчетной конечно-объемной (КО) модели составил: 6.7 млн.

Расчётная модель представлена на рис. 3.2.4

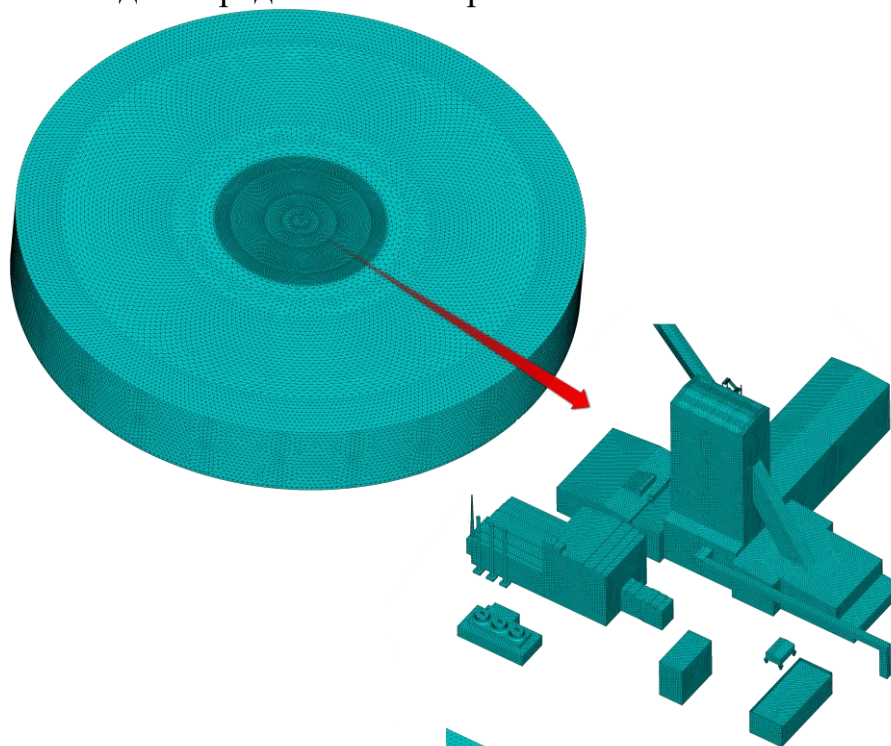


Рис. 3.2.4 - Сооружения ствола СКС-1 рудника

- а) конечно-объемная модель воздушного пространства (6 706 062 КО);  
б) сетка на поверхности зданий (размер элемента 0.75 м).

### 3.2.2.3 Граничные условия

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

Граничные условия на "входе" (*INLET*) соответствуют типу местности А ("открытая местность") и заданы в соответствии с данными ТСН НППРК. 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 учетом коэффициента надежности 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" (No-SlipWall,  $U=V=W=0$  м/с), исключающее проникновение вещества через поверхность.

В качестве *начальных условий* во всем домене задавались нулевые скорости ( $U=V=W=0$  м/с) и нулевые дополнительные давления.

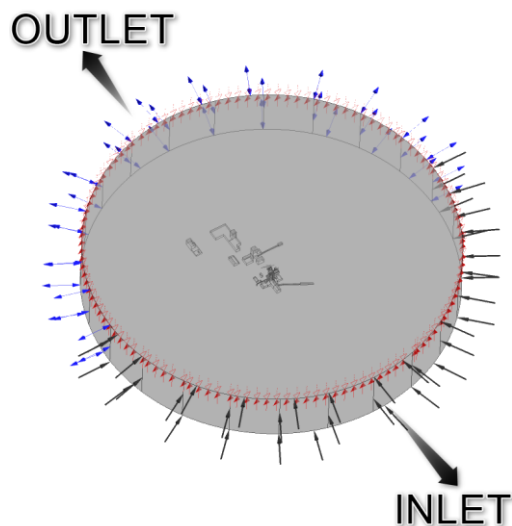
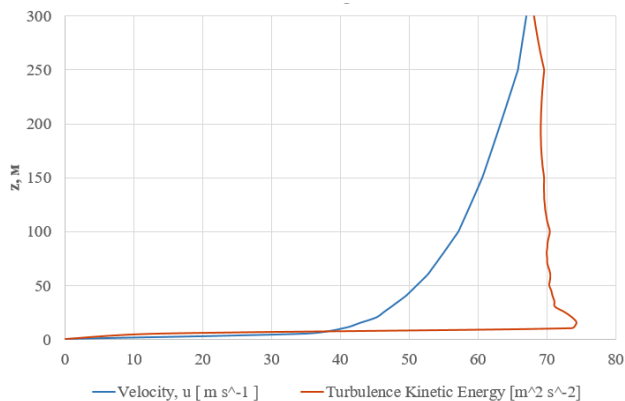


Рисунок 3.2.5 - Слева – Профили кинетической энергии турбулентности ТКЕ (синяя линия),  $\text{м}^2/\text{с}^2$ , и горизонтальной составляющей скорости ветра  $u$  (красная линия),  $\text{м}/\text{с}$ , согласно ТСН НППРК, тип местности А («открытая местность»), справа – расчетная область с обозначенными граничными условиями для угла атаки ветра  $0^\circ$ .

#### 3.2.2.4 Параметры расчётов

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

Критерием окончания счета 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 расчета. Для определения пиковых значений и пульсационной составляющей давления по опыту проведенных ранее расчетов приняты значения коэффициентов обеспеченности  $\theta_{min} = 6$  и  $\theta_{max} = 3$ . Отметим, что в отличие от гауссова распределения ( $\theta_{min} = \theta_{max} = 3$  для обеспечения вероятности 99.7%), данное распределение принято называть "скошенным". Значение коэффициента корреляции принято равным 1 (в запас).

#### 3.2.3 Результаты аэродинамических расчетов

Получены перечисленные ниже результаты многовариантных расчетных исследований без учета окружающего рельефа, но с учетом застройки.

Ветровые нагрузки на несущие конструкции:

- средние значения суммарных расчетных 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 (рис.3.2.6);

- аэродинамические коэффициенты средней ( $C_p$ , Па), динамической (амплитуда или полуразмах,  $C_{p_{dyn}}$ , (Па)) составляющей ветрового давления, коэффициент "динамичности" ( $k_{dyn} = Pressure_{dyn} / |Pressure| = C_{p_{dyn}} / |C_p|$ ) и расчетное значение аэродинамического коэффициента ветрового давления ( $C_{p_{summ}} = C_p + k_{dyn} \cdot C_p$ ) для соответствующих компонент (поверхность сбора аэродинамической нагрузки, рис. 3.2.9) каждого *Конра СКС-1*; в табличном виде (таблица 3.2.1)

- средняя ( $Pressure$ , Па), динамическая (амплитуда или полуразмах,  $Pressure_{dyn}$ , (Па)) составляющие ветрового давления и расчетное значение ветрового давления ( $Pressure_{summ} = Pressure + k_{dyn} \cdot Pressure$ ) для соответствующих компонент (поверхность сбора аэродинамической нагрузки, рис. 3.2.9) *Конра СКС-1* в табличном виде (таблица 3.2.2).

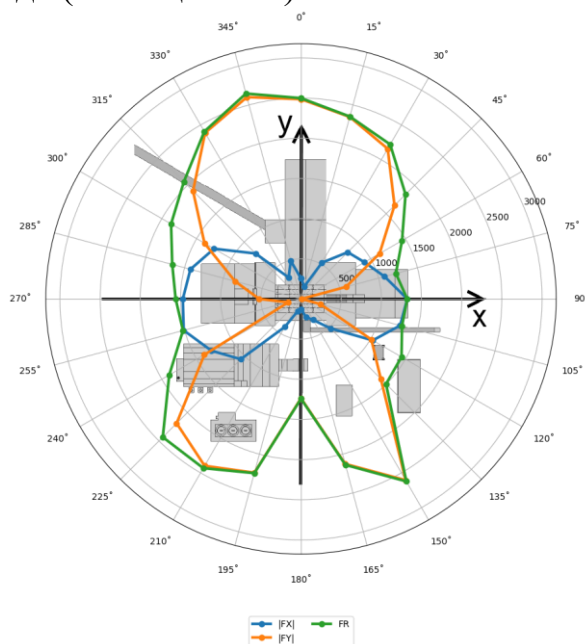


Рисунок 3.2.6 - Средние суммарные ветровые нагрузки на *Конёр СКС-1* в зависимости от направления ветра, кН.

FR – равнодействующая сила, FX, FY – проекции FR на оси координат. (значения приведены по модулю).

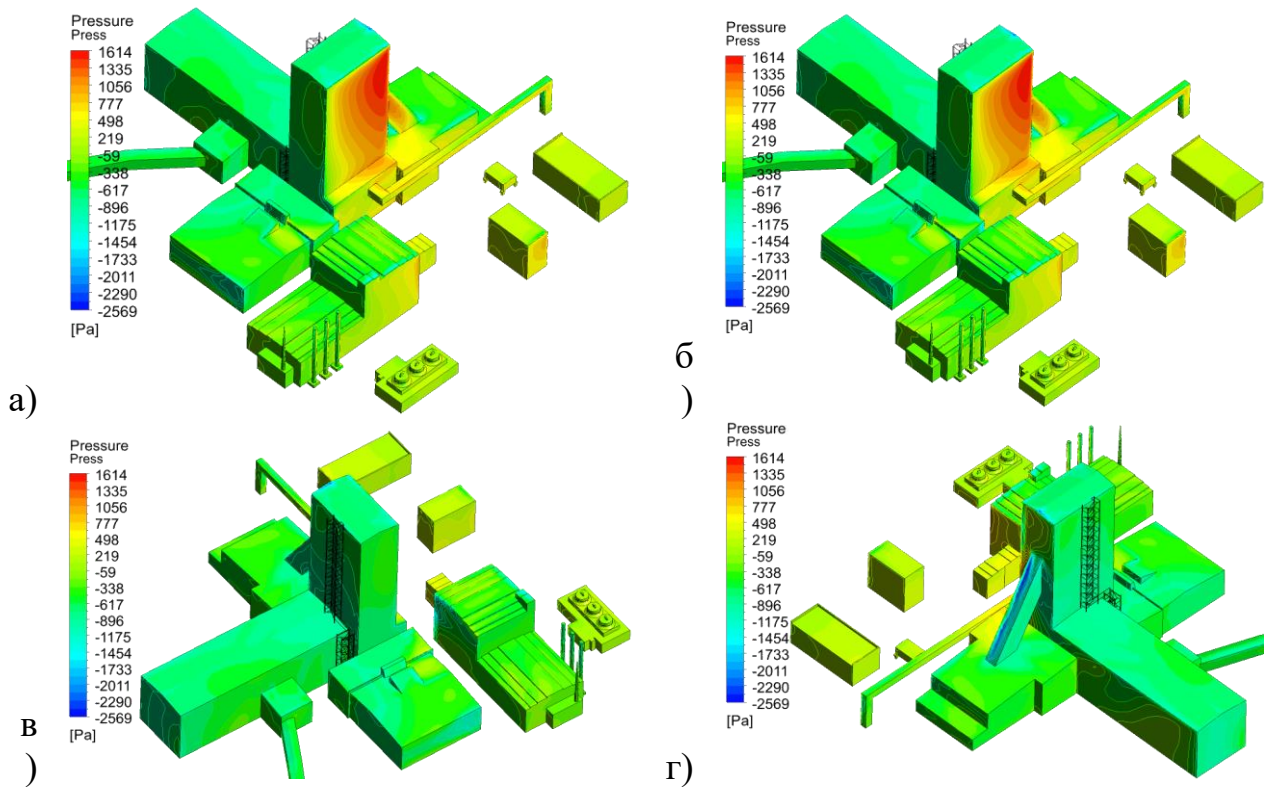


Рисунок 3.2.7 - Средние значения давлений (Па) на поверхности сооружений. Угол атаки ветра  $150^\circ$ .  $Max = 1.61$  кПа,  $Min = -2.57$  кПа

а), б) виды с наветренной стороны; в), г) виды с подветренной стороны

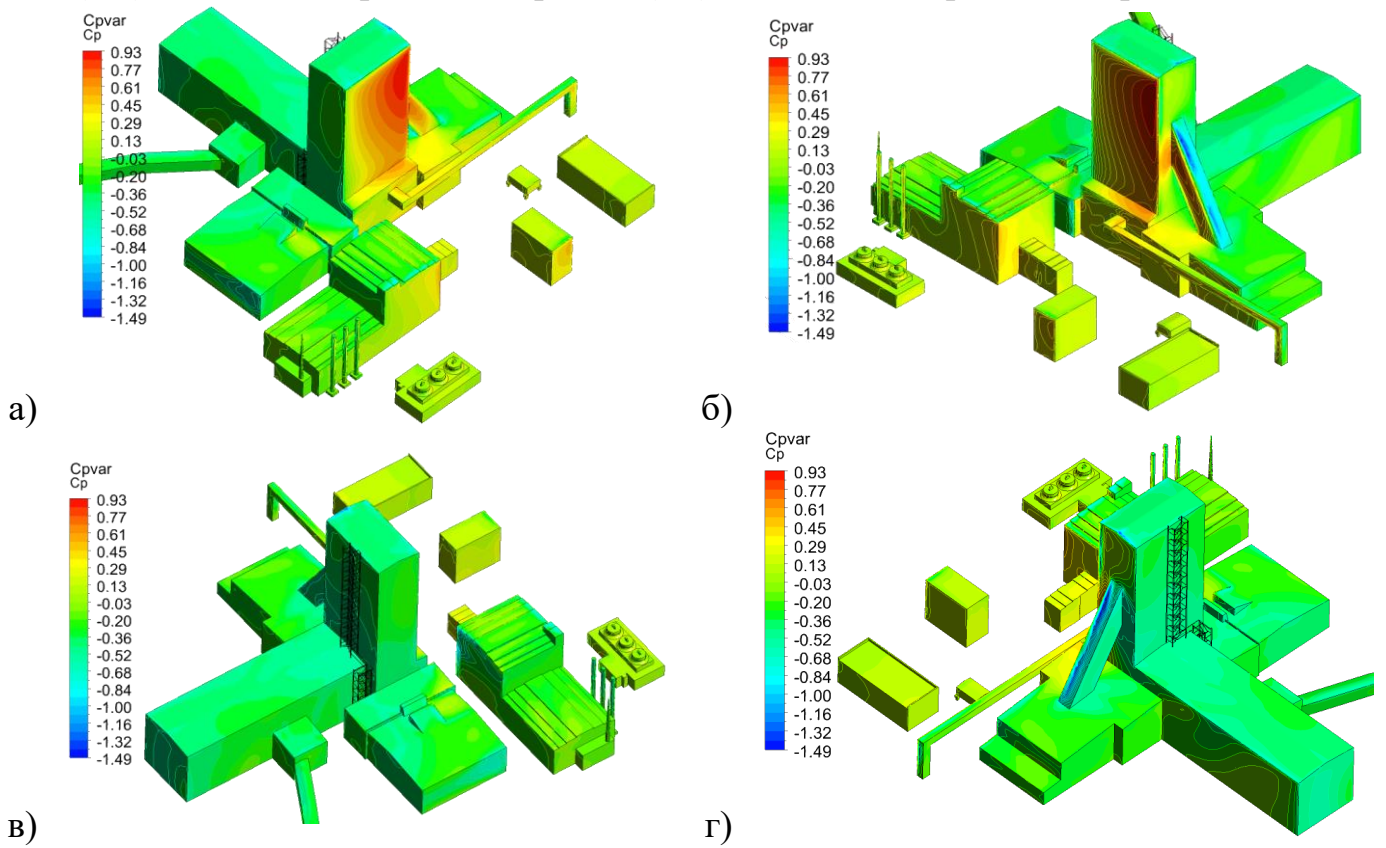


Рисунок 3.2.8 - Значения аэродинамического коэффициента на поверхности сооружений. Угол атаки ветра  $150^\circ$ .  $Max = 0.93$ ,  $Min = -1.49$

а), б) виды с наветренной стороны; в), г) виды с подветренной стороны

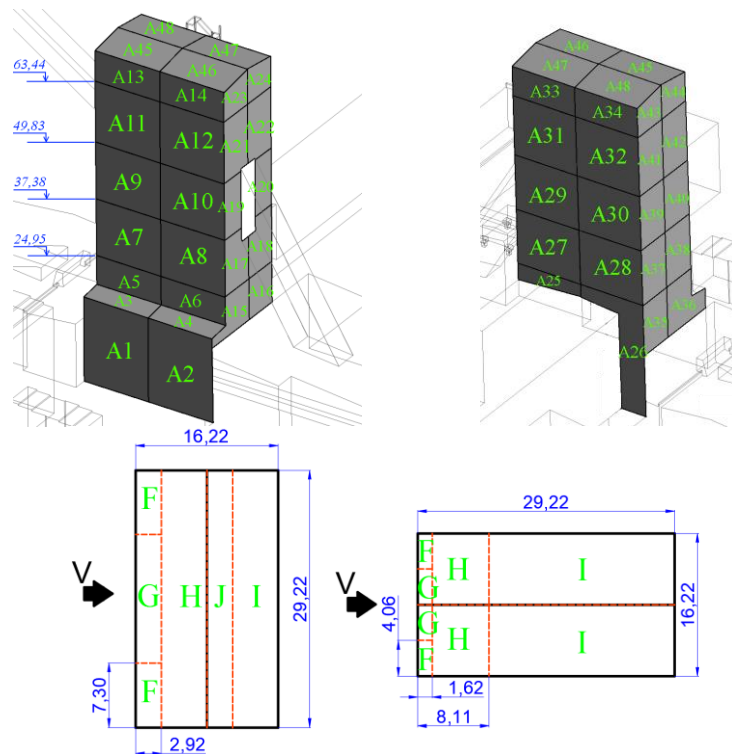


Рисунок 3.2.9 - Схема и нумерация компонент *Копра SKC-1*

Таблица 3.2.1 — *Фрагмент*. Расчётное значение аэродинамического коэффициента давления ( $C_{p_{summ}} = C_p + k_{dyn} \cdot C_p$ ), где  $C_p$  ( $V_{h=71.42m} = 54,03$  м/с), на компонентах *Копра SKC-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 3.2.2 — *Фрагмент*. Расчётное значение давления (Па) ( $Pressure_{summ} = Pressure + k_{dyn} \cdot Pressure$ ) на компонентах *Копра SKC-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

### 3.2.4. Анализ результатов и выводы.

Максимальное расчётное значение *средней составляющей* равнодействующей аэродинамической силы (FR) на несущие конструкции *Копра SKC-1* реализуется при угле атаки ветра  $345^\circ$  и составляет  $2647$  кН. Также опасным углом атаки ветра является  $150^\circ$ , для которого значение *средней*

составляющей равнодействующей аэродинамической силы (FR) составляет 2622 кН.

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

Угол атаки ветра  $180^\circ$ , 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, можно сделать следующие выводы:

1. Значения аэродинамических коэффициентов  $C_e$  на *наветренной стороне Копра СКС-1*, определённые в результате численного моделирования, меньше нормативных значений.

2. 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%.

3. 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%.

4. В целом нормативные значения аэродинамических коэффициентов  $C_e$ , определённые согласно СП 20.13330.2016 выше, чем определённые с помощью численного моделирования. В прочностных расчётах можно использовать «в запас» нормативные значения аэродинамических коэффициентов  $C_e$ .



### **3.3 Расчетное определение средних и пульсационных составляющих ветровых нагрузок на несущие конструкции одиночной ветроэнергетической установки (ВЭУ) с фиксированными лопастями**

#### **3.3.1 Общие сведения**

В приведенном расчетном исследовании выполнено следующее:

- анализ и обобщение проектной документации, анализ ветровых режимов района строительства, особенности расчетов ветрового нагружения ВЭУ в отечественных и зарубежных нормативных документах, постановка задач расчетных исследований.

- верификационные расчетные исследования в двумерной и трехмерной постановках для угла атаки  $0^\circ$ . Параметры расчетных сеток для проведения основных аэродинамических расчетов для других углов атаки ветра.

- определение средней и пульсационной составляющих аэродинамических нагрузок на несущие конструкции и фундамент ВЭУ при различных направлениях "ураганного" ветра (шаг  $45^\circ$ ) в трехмерной нестационарной постановке для двух вариантов фиксации положения лопастей.

#### **3.3.1.2 Краткая характеристика конструкций ВЭУ**

Площадка под проектируемый комплекс ВЭУ находится в е Ульяновской области.

Рассматриваемая ветровая турбина (ВЭУ DF110-2500LT) 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.

Материал лопастей – армированный стекловолокном полиэстер с применением технологии RIM для отливки лопастей.

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

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

Рама (включающая главную раму и вспомогательную раму) имеет компактную изящную конструкцию. Главная рама при помощи болтов соединена с генератором и верхом башни. Вспомогательная рама при помощи болтов прикреплена к главной раме. Крышка гондолы выполнена из пластика, усиленного стекловолокном, и имеет усовершенствованный внутренний элемент для повышения жесткости, благодаря чему снижается ее масса и повышается прочность.

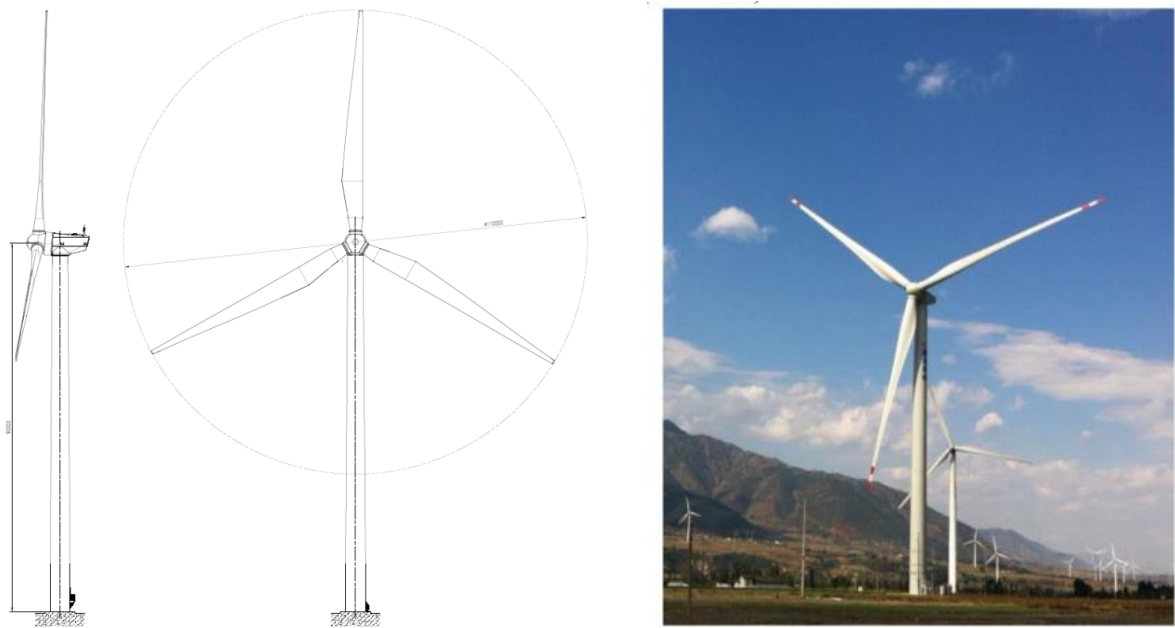


Рисунок 3.3.1 — Общий вид ВЭУ

### 3.3.1.3 Ветровые режимы и зоны строительства

Для оценки ветровых нагрузок необходимо применение метеорологии, микрометеорологии и климатологии. Метеорология дает 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 [3, 5] значение нормативного давления составляет 300 Па, что соответствует скорости ветра на высоте 10 м над землей 21.9 м/с. Расчетное ветровое давление с учетом коэффициента надежности по нагрузке 1.4, и с учетом коэффициента для типа местности  $k(z \leq 10 \text{ м})=1$ , составляет 355 Па, что соответствует расчетной скорости ветра на высоте 10 м над землей 25.9 м/с.

Рассматриваемый ВЭУ проектировался согласно IЕС 61400 [6], поэтому рекомендации по расчету на экстремальные параметры ветрового потока принимаются согласно этому стандарту. Экстремальный ветровой поток характеризуется следующими явлениями:

1. Среднесрочное появление ураганного значения скорости ветрового потока
2. Появление экстремальной турбулентности ветрового потока на высоте оси ВЭУ
3. 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:

$$V_{e50} = 1,4 * V_{ref}$$

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

$$\sigma_1 = c I_{ref} \left( 0,072 \left( \frac{V_{ave}}{c} + 3 \right) \left( \frac{V_{hub}}{c} - c \right) + 10 \right); c = 2 \frac{M}{c}$$

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

На рис.3.3.2 изображено сравнение профилей скорости ветра согласно стандарту IEC 61400 и согласно СНиП, умноженному на коэффициент 1.4.

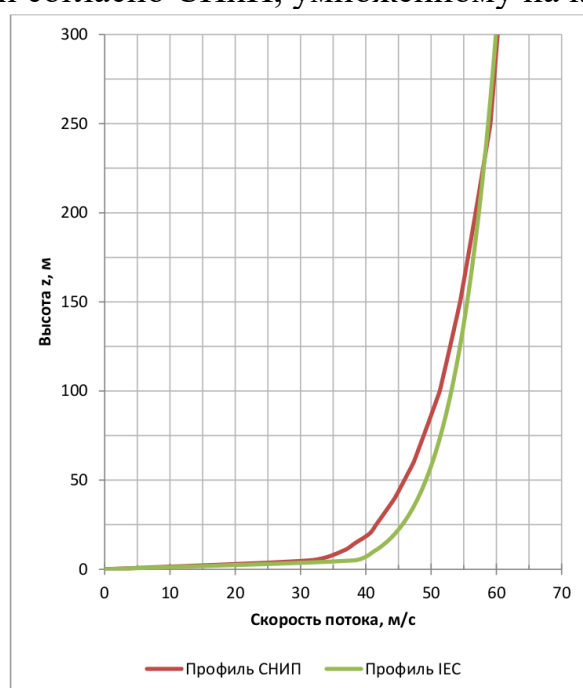


Рисунок 3.3.2 - Сравнение профилей горизонтальной составляющей скорости ветра  $u$  [м/с] согласно СНиП (умноженный на 1,4 для «ураганного» ветра) для второго ветрового района, тип местности А ("чистое поле") и согласно IEC 61400-1.

### 3.3.2 Разработка и верификация расчётной модели

#### 3.3.2.1 Геометрические модели ВЭУ

Практическая подготовка модели начинается с создания геометрической объемной модели сооружения. Геометрия одиночной ВЭУ выполнена согласно исходным данным. При создании трехмерной (3D) 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.

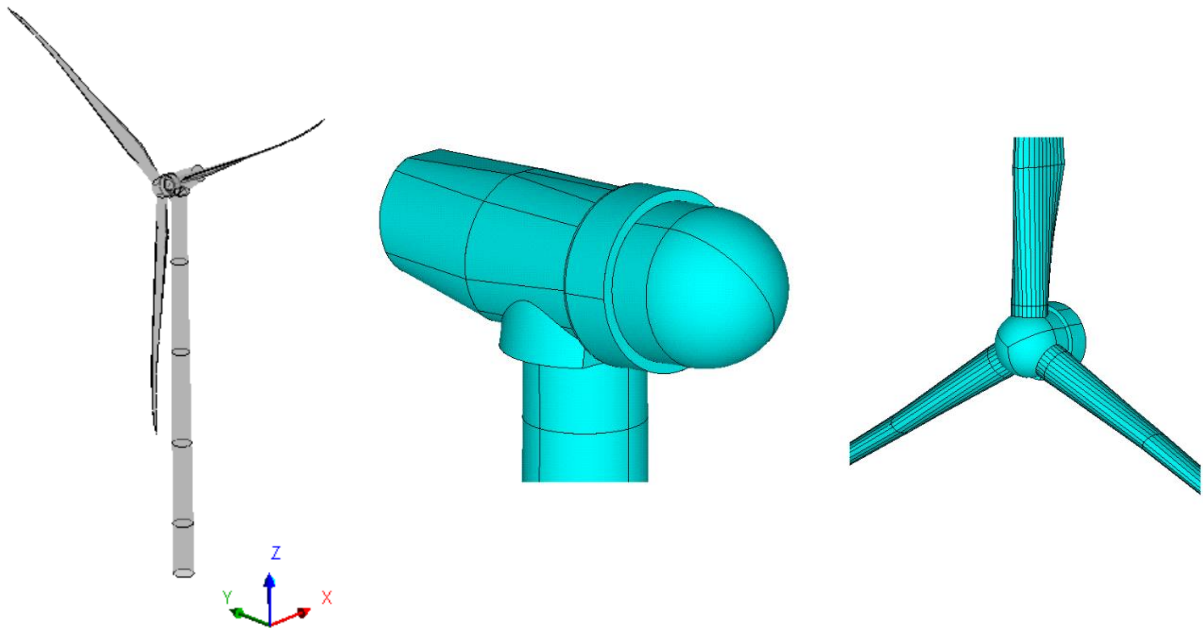


Рисунок 3.3.3 - Геометрическая 3D модель одиночной ВЭУ

### 3.3.2.2 Расчетные сетки

*Разработка модели для определения спектральной плотности мощности суммарных сил на фундамент ВЭУ*

Форма расчетной области – параллелепипед. Во всей модели около ВЭУ был построен пограничный слой. Размеры элементов были принимаются следующие:

1. Расстояние до первого узла от стенки в пограничном слое – 0,0003 м.
2. Размер элемента вдоль окружности – 0,03 м.
3. Размер элемента по высоте башни – 0,1 м.
4. Размер элемента на поверхностях лопастей и гондолы – 0,1 м.
5. Размер элемента в ближайшем объеме около ВЭУ – 0,13125 м.
6. Максимальный размер элемента в объеме – 9 м.

Количество конечных объемов в данной модели – 31009545. Граничные условия идентичны «рабочим моделям».

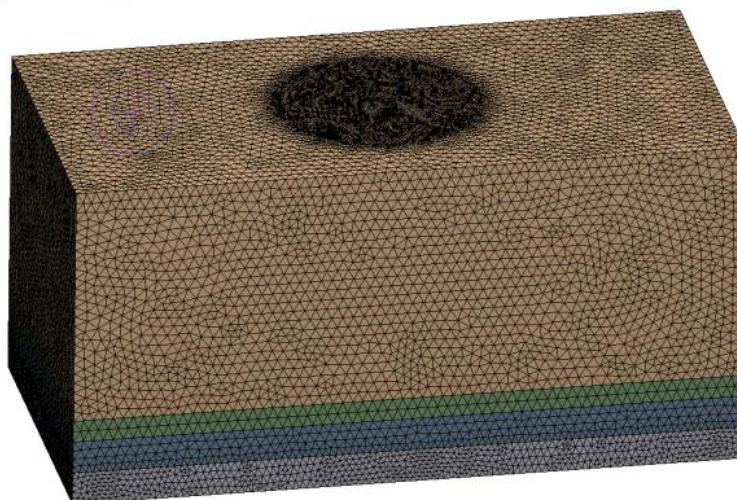


Рисунок 3.3.4 - Общий вид расчетной области

### *Разработка рабочих моделей*

Рассматриваемое положение, при котором направление ветра перпендикулярно плоскости вращения лопастей, было обосновано выше. Но после остановки ВЭУ, направление ветра может резко меняться, при этом ВЭУ может не успевать реагировать. Поэтому 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. Ввиду большого количества расчетных случаев (5 направлений ветра для 2 положений лопастей) и большой размерности «приемлемой» сетки, было решено разработать «рабочие» модели меньшей размерности, позволяющие получить средние и пульсационные составляющие аэродинамических нагрузок с удовлетворительной точностью.

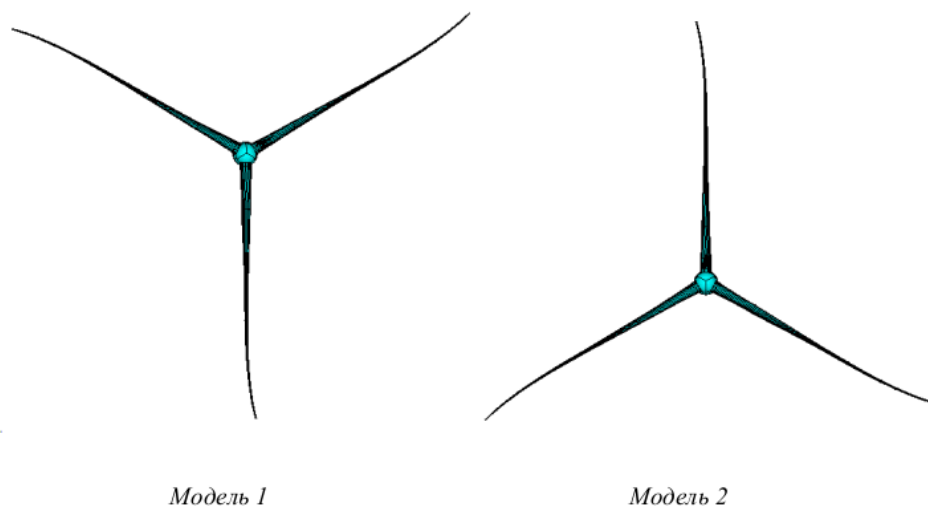


Рисунок 3.3.10 - Положения лопастей, исследуемые в трехмерной модели.

Для проведения основных аэродинамических расчетных исследований были приняты следующие размеры элементов сетки:

1. Пограничный слой вокруг башни состоящий из 10 элементов, толщина первого элемента – 0.003 м. Размер элемента по окружности – 0.17 м (80 элементов по периметру башни).
2. Размер элементов на поверхности башни по высоте – 0,5 м.
3. Размер элементов на поверхности гондолы и лопастей – 0,25 м.
4. Размер элементов на поверхности в ближней зоне в радиусе 0,09 км – 1 м – со «сгущением» сетки ближе к башне до 0,5 м., в объеме – 1,5 м.
5. Размер элементов на поверхности в дальней зоне увеличивается сначала до 2 и потом до 3 м. Максимальный размер элементов в расчетной области достигает 9 м.

Вся расчетная область разделена на два «домена». Первый домен содержит всю расчетную область включая башню и гондолу, за исключением лопастей и ближайшего воздуха. Второй домен соответственно содержит лопасти. Это позволяет получить две расчетные модели для двух различных положений

лопастей без повторной генерации сетки, а только лишь поворотов второго домена.

Общий размер основных расчетных конечно-объемных (КО) моделей составил: ~5,68 млн. КО (см. рис.3.3.11).

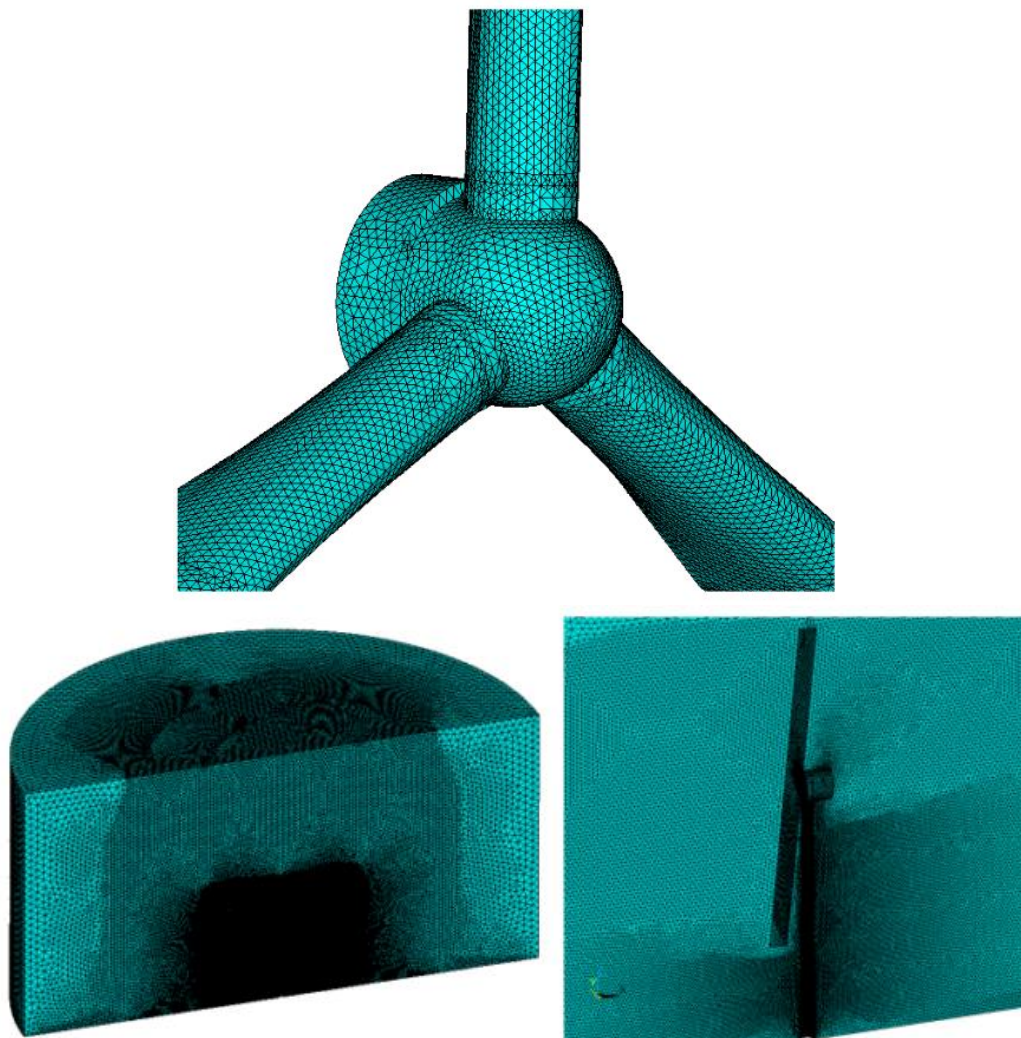


Рисунок 3.3.11 - Фрагменты расчетной сетки вычислительного домена радиусом 300 м. Количество узлов/конечных объемов - 5677162.

#### 3.3.2.4 Граничные и начальные условия

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

Граничные условия на "входе" (INLET) задавались в соответствии [6]. Зависимости от вертикальной координаты для скорости, кинетической энергии турбулентности и энергии диссипации:

$$V_{e50}(z) = 1,4V_{ref}(zz_{hub})^{0,11}$$

$$V_{ref} = 37,5 \frac{\text{М}}{\text{с}}; z_{hub} = 90\text{м}$$

$$\sigma_1 = cI_{ref} \left( 0,072 \left( \frac{V_{ave}}{c} + 3 \right) \left( \frac{V_{hub}}{c} - c \right) + 10 \right); c = 2 \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

$$V_{ave}(z) = 0,2 * V_{ref}; V_{hub} = 1,4 * V_{ref}; I_{ref} = 0,16$$

$$I = \frac{\sigma_1}{V_{hub}}; \Lambda = 42\text{ м}$$

Согласно этим формулам, на входе задавались интенсивность турбулентности и масштаб турбулентности, равный 42 м в соответствии с рекомендациями IEC 61400 [6].

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» (Free-slip Wall).

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

В качестве начальных условий во всем домене задавались нулевые скорости ( $U=V=W=0$  м/с) и нулевые дополнительные давления.

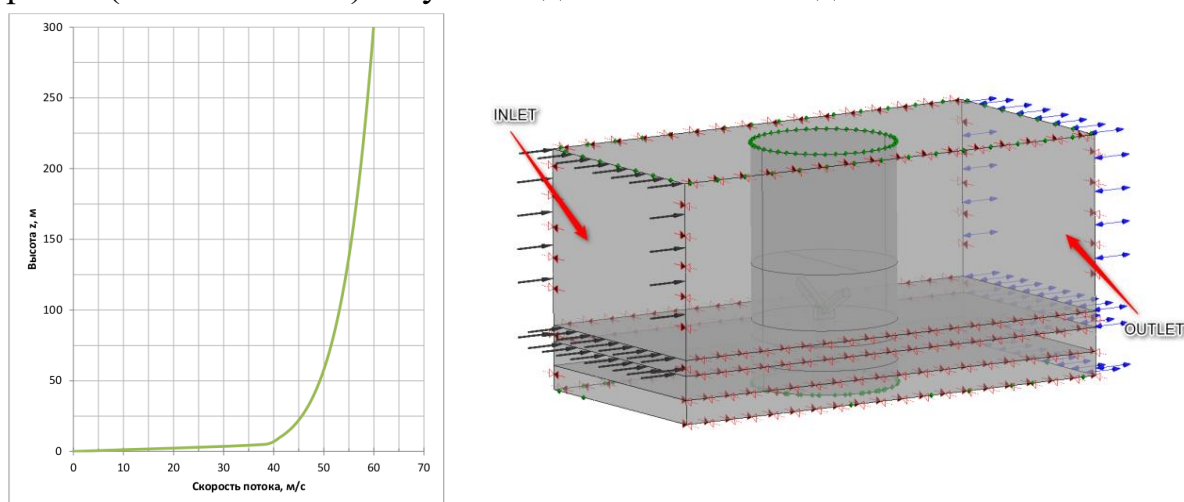


Рисунок 3.3.12 - Слева - Профиль горизонтальной составляющей скорости ветра  $u$  [м/с] согласно IEC 61400-1 для экстремального ветрового потока; справа - Расчетная область с обозначенными граничными условиями. Угол атаки ветра  $0^\circ$

### 3.3.2.5 Параметры расчета

Средние и пульсационные ветровые нагрузки на фундамент, а также главные частоты срыва вихрей определялись нестационарным расчетом

Физическое расчетное время составило 30 сек. В процессе расчета 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 процесс становился "стационарным".

### 3.3.3 Результаты аэродинамических расчетов

Получены перечисленные ниже результаты многовариантных расчетных исследований без учета окружающего рельефа, но с учетом застройки.

- Суммарные силы на фундамент ВЭУ от времени и спектральные плотности мощности суммарных сил на фундамент ВЭУ для угла атаки  $0^\circ$  (рис.3.3.13).

- Средние и пульсационные значения суммарных расчетных ветровых нагрузок на несущие конструкции ВЭУ в упомянутых выше осях (FX, FY, FZ, кН), векторная сумма нагрузки (FR, кН, рис.3.3.14) и моменты относительно осей (MX, MY, MZ, кН·м) для 5-х направлений (шаг по углу  $45^\circ$ ).

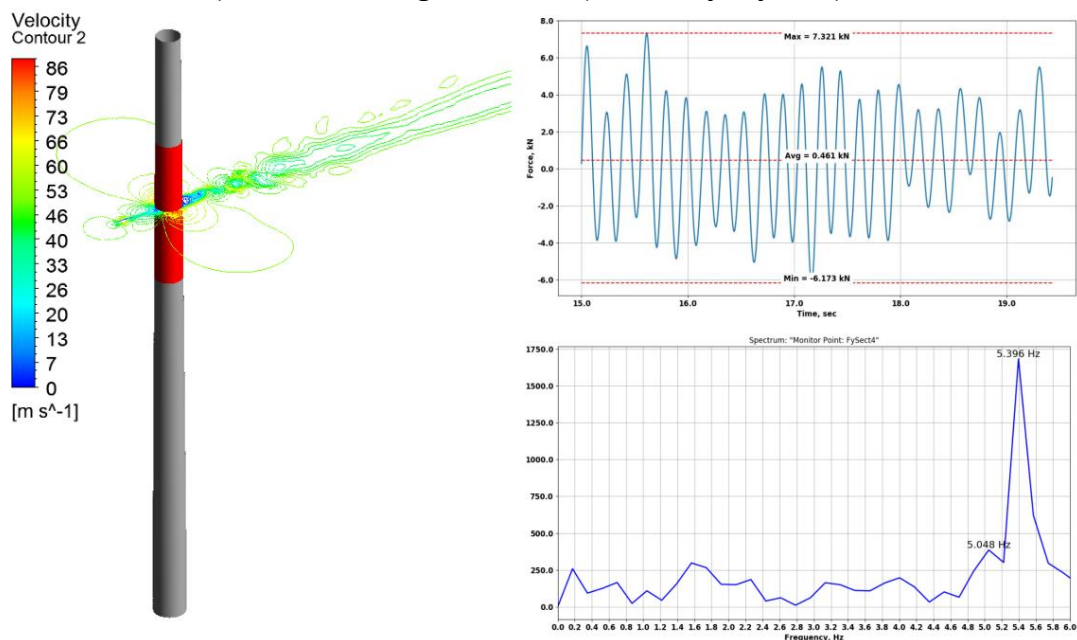


Рисунок 3.3.13 - Изолинии скоростей на высоте 6 м. (слева), изменение силы  $F_y$  [кН] на секцию (выделена красным) и ее спектральная мощность

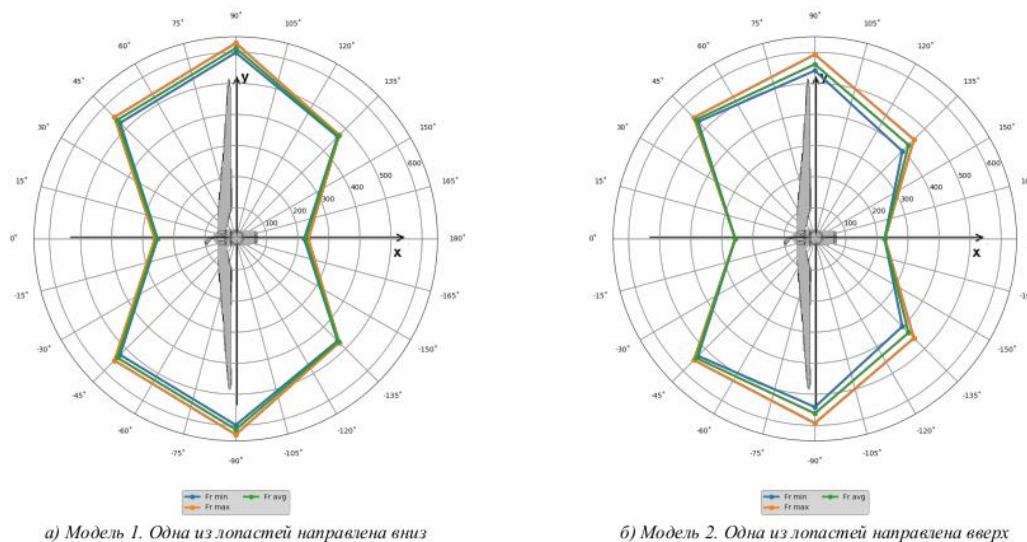


Рисунок 3.3.14 - Значение суммарной ветровой нагрузки  $F_r$  на фундамент от направления ветра, кН. (значения приведены по модулю)



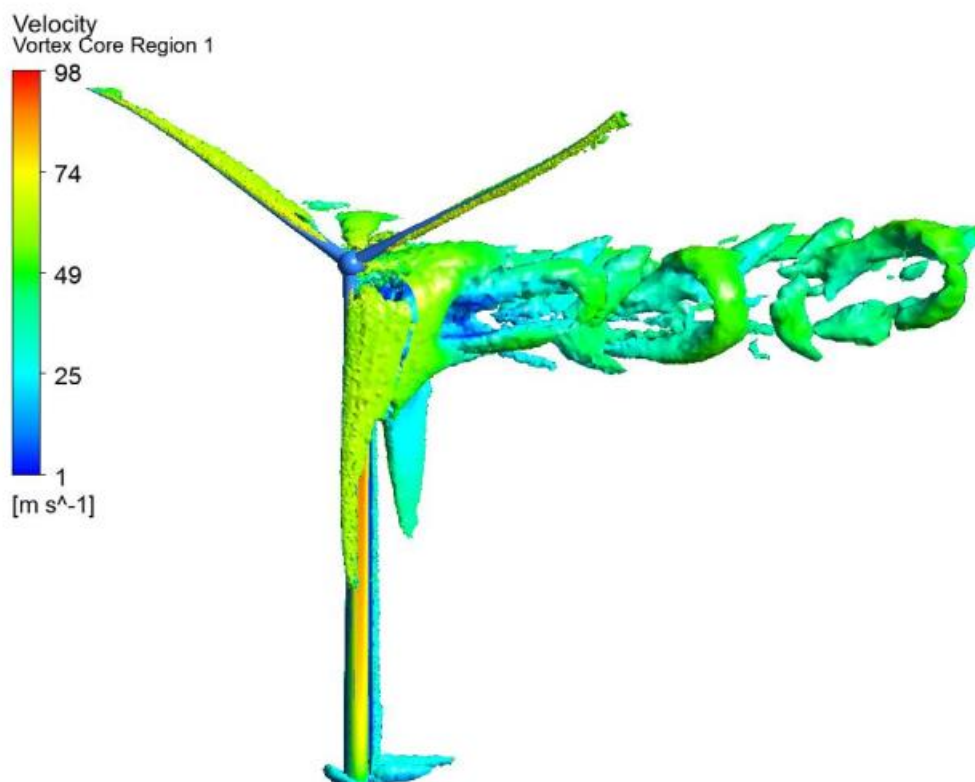


Рисунок 3.3.15 - Изоповерхности мощности локального "закручивания".  
Цветовые изополя скоростей [м/с].  
Модель 1. Угол атаки ветра 45°. Момент времени 20 сек.

### 3.3.4 Анализ и обобщение результатов

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

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

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

Для ВЭУ со вторым положением лопастей (одна из лопастей направлена вверх) максимальное расчетное значение средней составляющей равнодействующей аэродинамической силы (FR) на несущие конструкции реализуется при угле атаки ветра 90° и составляет 561,5 кН.

С точки зрения реализации максимальной равнодействующей аэродинамической силы (FR) 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 (МХ, МУ) на фундамент являются углы атаки ветра  $90^\circ$  и  $135^\circ$ .

Для ВЭУ со вторым положением лопастей (одна из лопастей направлена вверх) опасными с точки зрения средней составляющей изгибающего момента (МХ, МУ) на фундамент являются углы атаки ветра  $90^\circ$  и  $135^\circ$ .

Рекомендуется при проведении прочностных расчетов рассмотреть варианты ветрового нагружения, полученные для ВЭУ при углах атаки ветра  $90^\circ$  и  $135^\circ$ .

## Библиография

1. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия. Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 2001, 44 с.
2. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. М.: Минрегион России, 2011
3. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* (с Изменениями N 1, 2). М.: Минрегион России, 2019
4. МДС 20-1.2006. Временные нормы по назначению нагрузок и воздействий, действующих на многофункциональные высотные здания и комплексы в Москве.
5. Рекомендации по уточненному динамическому расчету зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки. – Госстрой России, сост. Попов Н.А. // М.: ГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2000. – 45 с.
6. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. М., ЦНИИСК им. Кучеренко. 1978.
7. *Симиу Э., Сканлан Р.* Воздействие ветра на здания и сооружения – Пер. с англ. Б.Е.Маслова, А.В. Швецово; Под ред. Б.Е. Маслова. // М.: Стройиздат, 1984. – 360
8. *Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Афанасьева И.Н.* Вычислительная аэродинамика в задачах строительства. М., Издательство АСВ, 2017, 720 с.
9. *Казакевич М.И.* Основы расчетов сооружений на ветровые воздействия. Монография. – М.: МГСУ, 2019. – 180 с.
10. *Дубинский С.И.* Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания. Дисс. на соискание ученой степени к.т.н. М., МГСУ, 2010. – 198 с
11. *Афанасьева И.Н.* Адаптивная методика численного моделирования трехмерных динамических задач строительной аэрогидроупругости. Дисс. на соискание ученой степени к.т.н. М., МГСУ, 2014. – 200 с
12. *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, 24-39.
13. *Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Афанасьева И.Н.* О «легитимизации» в строительных нормах и правилах численного моделирования ветровых воздействий на здания и сооружения. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2019, 15, 14-24.
14. *Афанасьева И.Н., Усманов А.Р.* Изучение трехмерной структуры воздушного турбулентного потока при обтекании призмы прямоугольной формы. // International Journal of Computational Civil and Structural Engineering, 2011, Volume 7, Issue 3, pp. 43-49
15. *Ахметов В.К., Шкадов В.Я.* Численное моделирование вязких вихревых течений для технических приложений. – М.: АСВ, 2009 – 270 с
16. *Барштейн М.Ф.* Ветровая нагрузка на высокие здания. // Строительная механика и расчет сооружений, 1974, №6, с. 2-9.
17. *Березин М.А., Катюшин В.В.* Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций. – Новосибирск: Олден-Полиграфия, 2003. – 130 с.
18. *Ван-Дайк М.* Альбом течений жидкости и газа. – М.: Мир, 1986. – 184 с
19. *Годунов С.К.* (ред.) Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976. – 400 с
20. *Дорошенко А.В.* Методика численного моделирования скоростей ветра и пешеходной комфортности в зонах жилой застройки. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». – М.: МГСУ, 2013. – 169 с
21. *Дубинский С.И., Дорошенко А.В.* Методика оценки аэродинамической комфортности пешеходных маршрутов в городе Москва с использованием численного моделирования. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2013, Volume 9, Issue 4, pp. 137

22. *Peÿpe P., Teйлор T.Д.* Вычислительные методы в задачах механики жидкости. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 352 с.
23. *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 618 с.
24. *Barth T.J.* Aspects of unstructured grids and finite-volume solvers for the Euler and Navier–Stokes equations // VKI Lecture Series. – Belgium: Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1994. – No. 1994-05, 152 pages
25. *Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J.* CFD simulation of atmospheric boundary layer-wall function problems. // Atmospheric Environment, 2007, Vol. 41(2), pp. 238-252.
26. *Davenport A.G.* The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. // J. Royal Meteorol. Soc., 1961, No. 87, pp. 194-211.
27. *Davenport A.G., Plate E.J., Viegas D.X., Cermak J.E.* Wind Climate in Cities. NATO Advanced Science Institute Series E, Volume 277, Kluwer Academic Press, 1993, 772 pages.
28. *Davidson L.* An introduction to turbulence models, Department of Thermo and Fluid Dynamics // Chalmers University of Technology, Publication 97/2, Sweden, 2003, pp. 1-8.
29. *Dyrbye C., Hansen S.O.* Wind loads on structures. New-York, John Wiley & Sons, 1999, 229 pages.
30. *Ferziger J., Peric M.* Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer-Verlag, BerlinHeidelberg, 2001, 431 pages
31. *Franke J., Hirsch C., Jensen A.G., Krs H.W., Schatzmann M., Westbury P.S., Miles S.D., Wisse J.A., Wright N.G.*, 2004. Recommendations on the use of CFD in wind engineering. // Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics. In van Beeck JPAJ (Ed.), COST Action C14, Impact of Wind and Storm on City Life Built Environment, von Karman Institute, Sint-Genesius-Rode, Belgium, 5-7 May 2004, 2004, 52 pages.
32. *Hirt C.W., Nichols B.D.* Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. // J. Comput. Phys., 1981, 39(1), pp. 201-225
33. *Holmes J.D.* Wind loading of structures. Great Britain, Eastbourne, 2005, 356 pages
34. *Jameson A., Schmidt W., Turkel E.* Numerical solutions of the Euler equations by finite volume methods using Runge-Kutta time-stepping schemes. // AIAA Paper. 1981. No. 81-1259.
35. *Mochida A., Tominaga Y., Murakami S., Yoshie R., Ishihara T., Ooka R.* Comparison of various k- $\epsilon$  model and DSM applied to flow around a high-rise building – report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment. // Wind & Structures, 5, No. 2-4, 2002, pp. 227-244.
36. *Mochida A., Tominaga Y., Murakami S., Yoshie R., Ishihara T., Ooka R.* Comparison of various k- $\epsilon$  model and DSM applied to flow around a high-rise building – report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment. // Wind & Structures, 5, No. 2-4, 2002, pp. 227-244.
37. *Moin P., Mahesh K.* Direct numerical simulation. – A tool in turbulence research // Annual Rev. Fluid Mech., 1998, Vol. 30, pp. 539-578
38. *Murakami S.* Wind tunnel modeling applied to pedestrian comfort. In: Reinhold, 1982, pp. 486-503.
39. *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.
40. *Spalart P.R.* Strategies for turbulence modeling and simulations. // Int. J. Heat Fluid Flow, 2000, Vol. 21, pp. 252-263
41. *Stangroom P.* Computational fluid dynamics for wind farm optimization. School of Civil Engineering, University of Nottingham, 2001
42. *Tominaga Y., Mochida A. et al.* AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, Volume 96, Issues 10-11, pp. 1749-1761.
43. *Wilcox D.C.* Turbulence Modelling for CFD. DCW Industries Inc., California, 1993.