

# Научно-исследовательский центр СтаДиО

## АО НИЦ СтаДиО

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

125124, Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д.18, эт. 8, помещ. IX, ком. 13, т. (499)706-8810, e-mail: [stadvo@stadvo.ru](mailto:stadvo@stadvo.ru)

Инв. № ВОРЦСП9-24/08-1

«Утверждаю»  
Генеральный директор АО НИЦ СтаДиО



А.М. Белостоцкий  
2025 г.

### Научно-технический отчет

по договору № ВОРЦСП9/08-2024 от 23.08.2024 г.

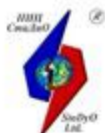
**«Комплексное научно-техническое сопровождение проектирования  
для Объекта – «Центральный стадион ФК «Факел», г. Воронеж,  
ул. Студенческая, 17»**

**Этап 2. Подготовка итоговых рекомендаций по назначению ветровых  
и снеговых воздействий на несущие и фасадные конструкции Объекта,  
на основе результатов математического и физического моделирования**

Руководители работы:  
докт. техн. наук, академик РААСН А.М. Белостоцкий  
канд. техн. наук Д.С. Дмитриев

Ответственный исполнитель:  
О.С. Горячевский

Исполнители:  
канд. техн. наук Н.А. Бритиков  
И.Ю. Негрозова  
А.Ю. Купреева



# Научно-исследовательский центр СтаДиО

## АО НИЦ СтаДиО

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

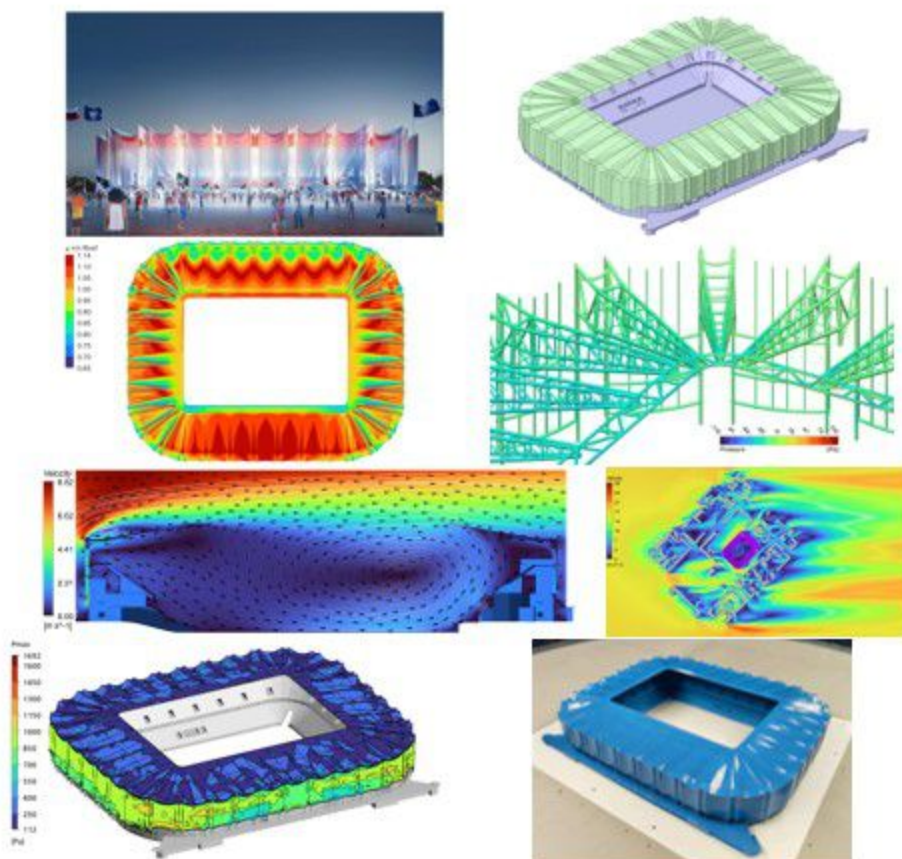
125124, Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д.18, эт. 8, помещ. IX, ком. 13, т. (499)706-8810, e-mail: [stadvo@stadvo.ru](mailto:stadvo@stadvo.ru)

Инв. № ВОРЦСП9-24/08-1

### Научно-технический отчет

по договору № ВОРЦСП9/08-2024 от 23.08.2024 г.

**Этап 2. Подготовка итоговых рекомендаций по назначению ветровых и снеговых воздействий на несущие и фасадные конструкции Объекта, на основе результатов математического и физического моделирования, включая оценку возможности возникновения резонансных вихревых возбуждений и аэродинамической неустойчивости**



## 2. Исходные данные. Постановка задач

В главе представлено:

- описание местоположения, окружающей застройки, рельефа и климата площадки строительства;
- краткое описание Объекта аэродинамических исследований;
- постановка целей и задач аэродинамических исследований.

### 2.1. Площадка строительства, рельеф и застройка объекта

Площадка под строительство Объекта располагается в Центральном районе города Воронеж. Участок под проектирование расположен в исторической городской застройке, в стесненных условиях проектирования, в территориальной зоне ОДМ (смешанной общественно-деловой застройки). С северо-запада участок ограничен Студенческой улицей, с юга-запада – улицей Комиссаржевской, с юго-востока – улицей Фридриха Энгельса, с северо-востока – улицей Чайковского.

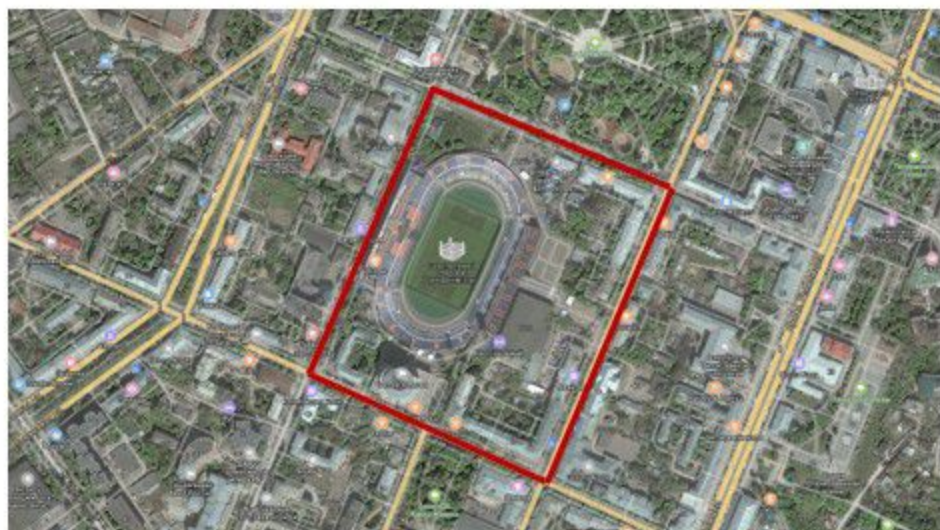


Рис. 2.1 Площадка строительства на карте г. Воронеж (источник: *maps.yandex.ru*)

Локальный рельеф местности в радиусе 500 м от Объекта в основном ровный, перепад высот по сравнению с высотой Объекта незначительный (рис. 2.3). Присутствует требующая учета аэродинамически значимая окружающая застройка, средняя высота которой сопоставима с высотой Объекта.

Роза ветров для г. Воронеж представлена на рис. 2.4.

Согласно СП 20.13330.2016, площадка строительства находится в **II ветровом районе** (нормативное значение ветрового давления  $w_0 = 0.30$  кПа) и **III снеговом районе** (нормативное значение веса снегового покрова  $S_g = 1.55$  кПа согласно табл. К.1 Приложения К к СП). При определении ветровых нагрузок принят тип местности **B**, т.к. Объект окружен значимой окружающей застройкой.

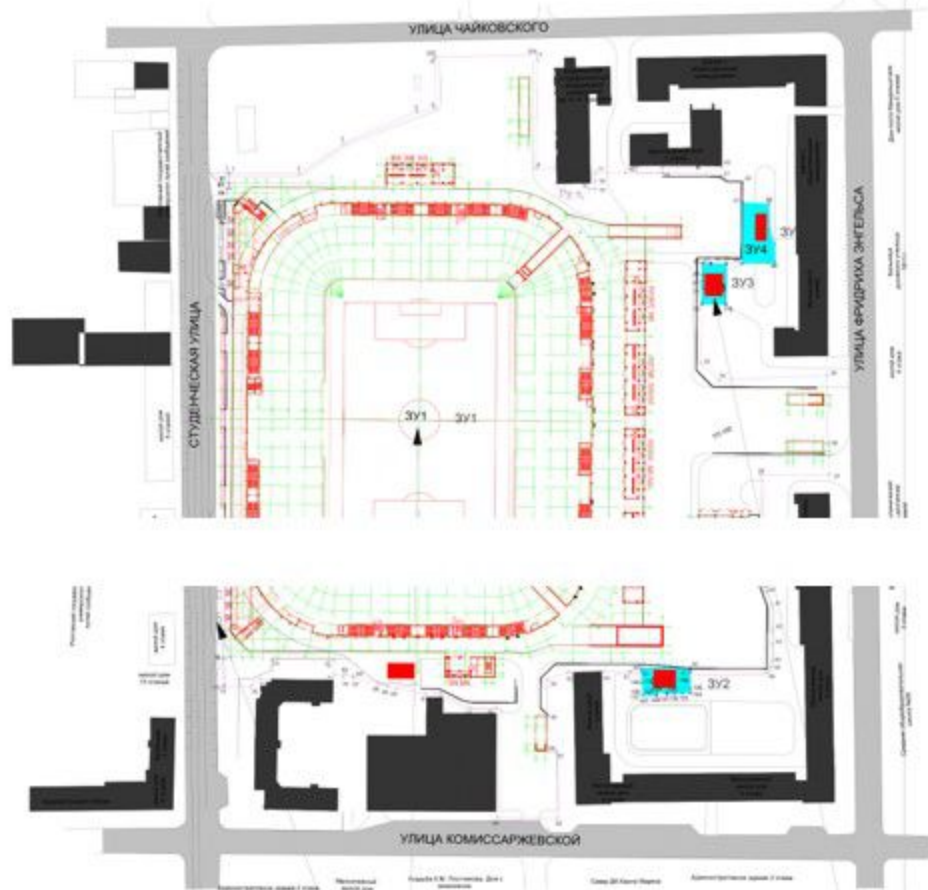


Рис. 2.2 Ситуационный план Объекта [1]



Рис. 2.3 Карта высот возле площадки строительства по данным OpenStreetMap

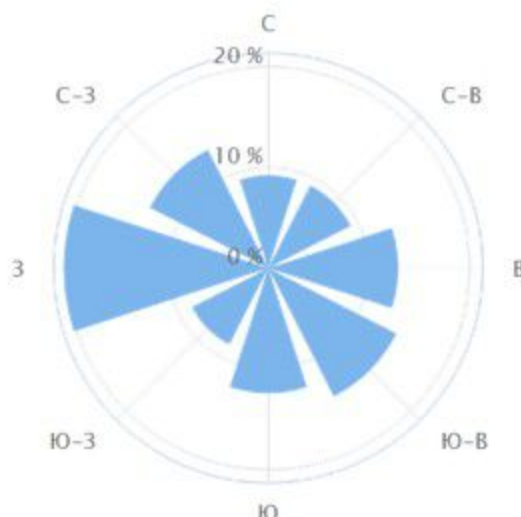


Рис. 2.4 Повторяемость ветров в г. Воронеж, % (источник: world-weather.ru)

## 2.2. Краткая характеристика исследуемого Объекта

Здание – пятиэтажный открытый стадион с подвалом – представляет собой прямоугольный в плане объем со скругленными углами, габаритами в осях 194.2 x 154.2 м (наземная часть), наивысшая отметка – +32.3 м. Трибуна стадиона запроектирована на не более чем 24 000 посадочных мест. Здание имеет уникальный облик. Периметр объема здания формируется фасадным контуром из перфорированной мембраны белого цвета. Предусмотрена архитектурная подсветка стадиона.

Спортивная арена запроектирована с открытой игровой зоной, над всеми зрительскими местами над трибунами предусмотрен навес с покрытием из ПВХ мембраны. Мембранное покрытие выполнено по несущим стальным конструкциям навеса с применением вантовой системы.

Конструктивная система навеса стадиона представляет собой единую пространственную стержневую конструкцию, состоящую из отдельных пространственных консольных ферм, объединенных вертикальными и горизонтальными связями, прогонами и распорками. Каждая консольная ферма имеет цилиндрическое сечение переменное по длине пролета, состоит из 2-х нижних и 2-х верхних поясов, пояса раскреплены вертикальными и горизонтальными раскосами.

Фасад стадиона запроектирован с применением ПВХ мембраны, которая прикрепляется к наружным колоннам каркаса стадиона с помощью вантовых и фахверковых стальных конструкций.

Конструктивная система «чаши стадиона» состоит из разноэтажных монолитных железобетонных рам, расположенных вокруг футбольного поля, перпендикулярно к нему, а в угловых зонах - по радиусам, направленным в углы поля. Рамы «чаши» объединяются в пространственную конструкцию монолитными железобетонными перекрытиями с балочными элементами складок трибун.



Рис. 2.5 Стадион – общий вид (рендер)



Рис. 2.6 Стадион – вид вблизи (рендер)

### 2.3. Постановка задач расчетных исследований

В соответствии с техническим заданием [1] и по результатам анализа и обобщения нормативной и проектной документации Объекта ставятся и решаются следующие задачи:

1. Разработка трехмерных численных моделей аэродинамики Объекта с учетом и без окружающей застройки местности для 24-х (для ветровых нагрузок) и 8-и (для снеговых нагрузок) направлений ветра.
2. Численное моделирование распределения средних ветровых давлений на несущие конструкции Объекта с учётом и без окружающей застройки.
3. Численное моделирование распределения пиковых ветровых давлений на ограждающие (фасадные) конструкции Объекта с учётом и без окружающей застройки.
4. Численное моделирование снегопереноса на покрытиях Объекта с учётом и без окружающей застройки;
5. Разработка на основе синтеза нормативных методик и результатов численного моделирования рекомендаций по назначению снеговых нагрузок на покрытие Объекта в виде расчетных схем расчетного коэффициента  $\mu$ .

## 8. Презентационные материалы

В главе представлена визуализация скоростей воздушных потоков и средних давлений для расчетного направления ветра  $135^\circ$  с учетом окружающей застройки (рис 8.1-8.5).

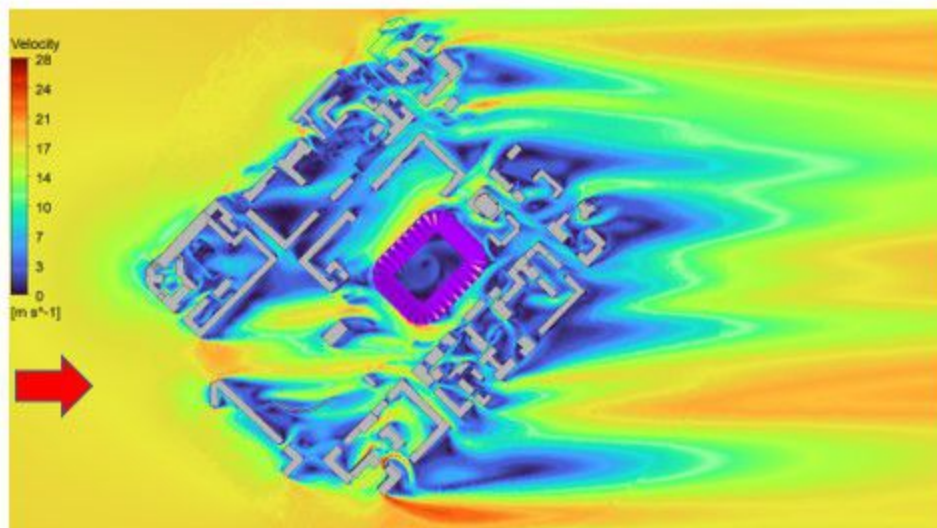


Рис. 8.1 Средние значения скорости ветрового потока на высоте 10 м над уровнем земли

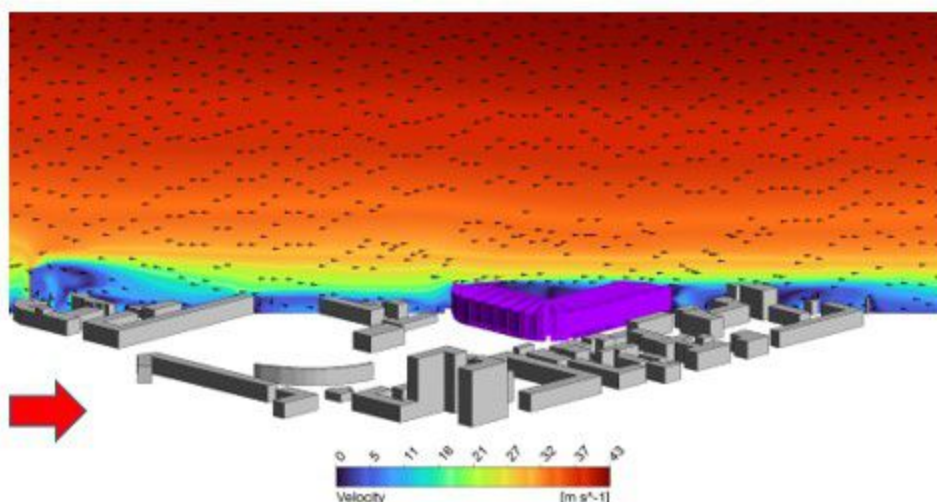


Рис. 8.2 Средние значения скорости ветрового потока в поперечном сечении расчетной области и векторное обозначение его направления

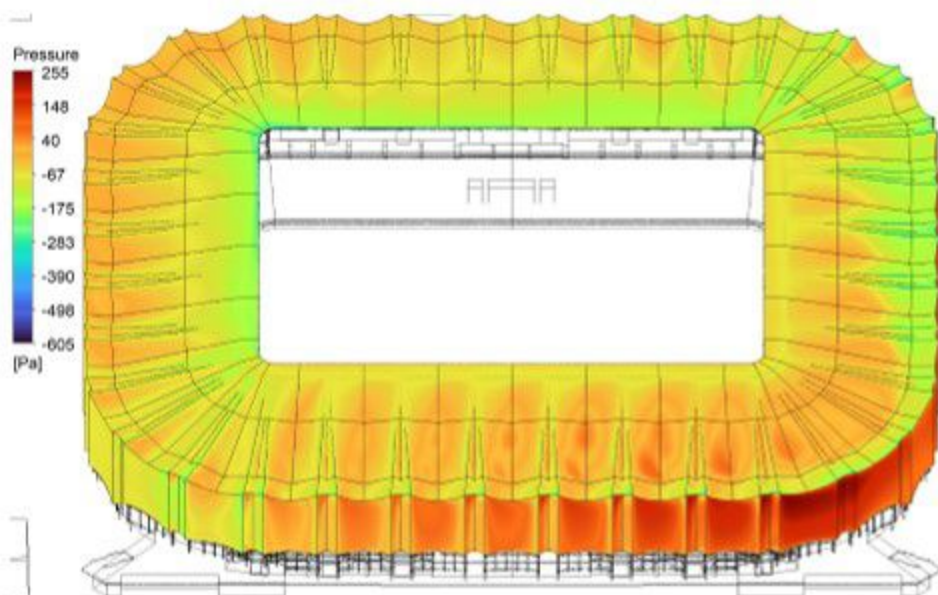


Рис. 8.3 Средние ветровые давления  $\Delta P$  на мембрану Объекта, Па

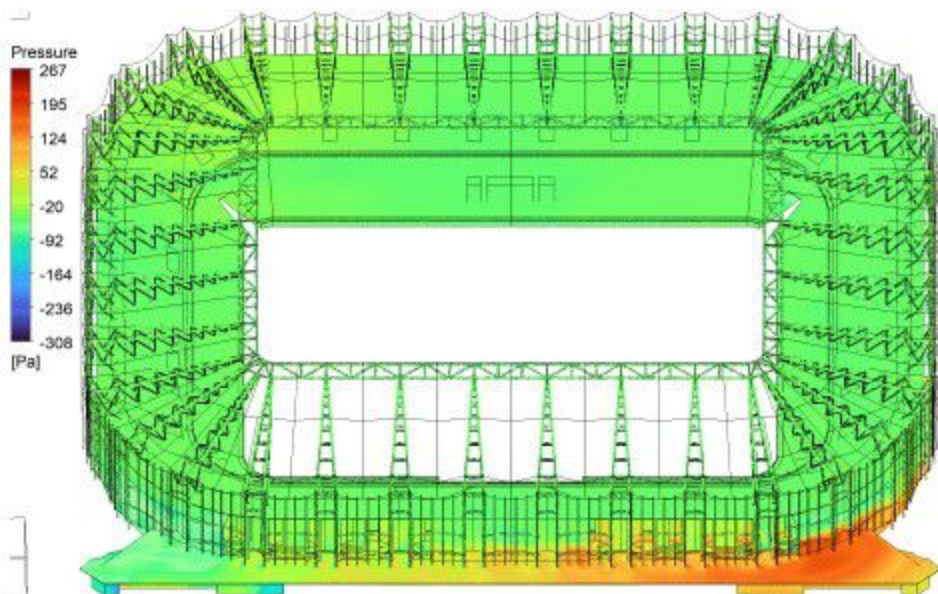


Рис. 8.4 Средние ветровые давления  $\Delta P$  на несущие конструкции Объекта и металлоконструкции, Па

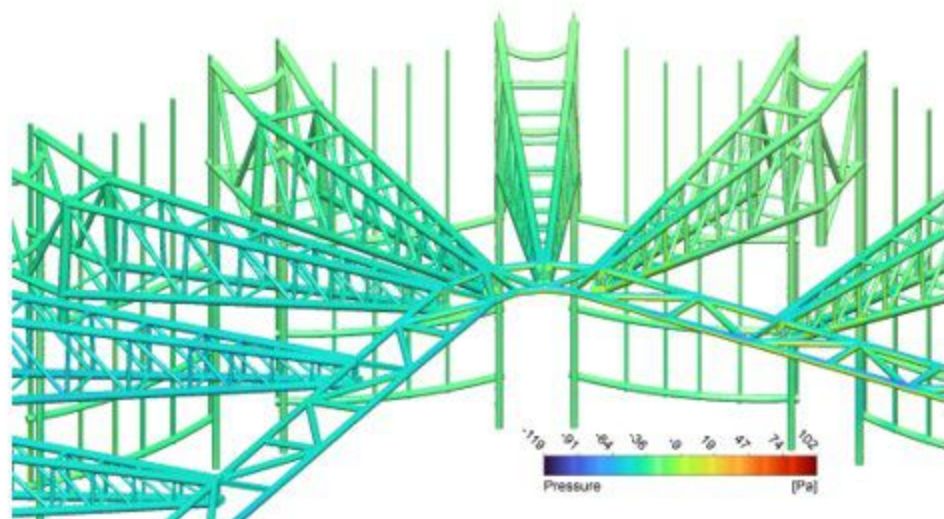


Рис. 8.5 Средние ветровые давления  $\Delta P$  на металлоконструкции *Объекта*, Па (фрагмент)

## Итоговые выводы и рекомендации

В результате работ по Этапу 2 НИР «Подготовка итоговых рекомендаций по назначению ветровых и снеговых воздействий на несущие и фасадные конструкции Объекта, на основе результатов математического и физического моделирования», выполненных АО НИЦ СтаДиО по договору № ВОРЦСП9/08-2024 от 23.08.2024 г. по теме «Комплексное научно-техническое сопровождение проектирования для Объекта – «Центральный стадион ФК «Факел», г. Воронеж, ул. Студенческая, 17», сформулированы следующие выводы и рекомендации:

1. На основе анализа и обобщения исходных данных разработаны и верифицированы численные модели аэродинамики Объекта:

- модель 1 для определения ветровых нагрузок на несущие и ограждающие конструкции Объекта без учёта окружающей застройки;
- модель 2 для определения ветровых нагрузок на несущие и ограждающие конструкции Объекта с учётом окружающей застройки;
- модель 3 для определения снеговых нагрузок на конструкции покрытия Объекта без учёта окружающей застройки;
- модель 4 для определения снеговых нагрузок на конструкции покрытия Объекта с учётом окружающей застройки.

2. С использованием современных численных методов гидрогазодинамики, реализованных в наукоемком программном комплексе ANSYS CFD (Fluent), в комбинации с методиками решения узкоспециализированных задач строительной аэродинамики, изложенных в СТО «Численное моделирование ветровых и снеговых воздействий» [4], проведены многовариантные расчетные аэродинамические исследования Объекта. Моделирование ветровых нагрузок проводилось с учётом и без окружающей застройки для 24-х направлений ветра, а снеговых – для 8-ми направлений ветра при 3-х скоростных режимах.

3. В большой исследовательской градиентной аэродинамической трубе архитектурно-строительной специализации (БИГАТ НИУ МГСУ) проведены многовариантные экспериментальные исследования аэродинамики Объекта без учёта окружающей застройки для 24 направлений ветра и моделирование снеготеноса для 8 направлений ветра.

4. Верификация и валидация численных моделей показала возможность их использования для получения стабильных и достоверных результатов в смысле соответствия постановке задач.

4.1. Сопоставление аэродинамических коэффициентов  $c_p$ ,  $c_{p,(-)}$  для характерных направлений ветра  $45^\circ$  и  $135^\circ$  показывает высокое качественное и количественно сходство между результатами физического и численного моделирования.

4.2. Сопоставление средних значений аэродинамических коэффициентов  $c_p$  показывает, что для подавляющего большинства точек средние ветровые давления по результатам численного моделирования несколько выше (по абсолютным значениям). Таким образом, при назначении основных ветровых нагрузок на **несущие конструкции** Объекта **рекомендуется** использовать результаты численного моделирования (глава 5).

4.3. Сопоставление пиковых положительных и отрицательных значений аэродинамических коэффициентов  $c_{p,(-)}$  показывает, что для подавляющего большинства

точек пиковые ветровые давления по результатам численного моделирования несколько выше (по абсолютным значениям). Таким образом, при назначении пиковых ветровых давлений на **ограждающие (фасадные) конструкции** Объекта **рекомендуется** использовать результаты численного моделирования (глава 6).

5. Выявлены наиболее опасные случаи ветрового нагружения для *тента и металлоконструкций*, **рекомендуемые** к учёту при обосновании механической безопасности Объекта:

|      |                     |                                                                                              |
|------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 45°  | без учёта застройки | $F_X = -521 \text{ кН}; F_Y = -901 \text{ кН}; F_R = 1041 \text{ кН}; F_Z = 1396 \text{ кН}$ |
| 135° | без учёта застройки | $F_X = -486 \text{ кН}; F_Y = 835 \text{ кН}; F_R = 966 \text{ кН}; F_Z = 1472 \text{ кН}$   |
| 225° | без учёта застройки | $F_X = 487 \text{ кН}; F_Y = -841 \text{ кН}; F_R = 971 \text{ кН}; F_Z = 1476 \text{ кН}$   |
| 315° | без учёта застройки | $F_X = 522 \text{ кН}; F_Y = -903 \text{ кН}; F_R = 1043 \text{ кН}; F_Z = 1403 \text{ кН}$  |

Расчётные значения ветровых нагрузок для всех 24-х исследуемых направлений ветра приведены в Приложении Г и также могут быть использованы при обосновании механической безопасности.

Случаи, учитывающие окружающую застройку, дают меньшие значения ветровых нагрузок и **не рекомендуются** к учёту при обосновании механической безопасности Объекта.

Ветровые нагрузки, непосредственно действующие на железобетонные конструкции и трибуны, **рекомендуется** не учитывать, т.к. их вклад в напряжённо-деформированное состояние пренебрежимо мало.

Пульсационную составляющую ветровой нагрузки рекомендуется определять на основе нормативных подходов, реализованных в соответствующих программных комплексах (например, SCAD Office, ЛИРА-САПР и ПК ЛИРА 10).

6. В результате проведенных расчетных исследований пиковых ветровых давлений при 24-х направлениях ветра выявлено следующее:

*без учета окружающей застройки:*

д) максимальные значения расчетных положительных пиковых ветровых давлений достигают **1 692 Па**, не превышают **300 Па** для **55%** площади фасадов *тента*, находятся в диапазоне **300-700 Па** – для **10.2%**, находятся в диапазоне **700-850 Па** – для **10.2%**, находятся в диапазоне **850-1000 Па** – для **22.3%**, превышают **1 000 Па** – для **2.4%**;

е) максимальные абсолютные значения расчетных отрицательных пиковых ветровых давлений достигают **2 872 Па** в локальных зонах на кровле, не превышают **500 Па** для **46.4%** площади фасадов *тента*, находятся в диапазоне **500-700 Па** – для **21.3%**, находятся в диапазоне **700-900 Па** – для **21.5%**, находятся в диапазоне **900-1 300 Па** – для **10%**, превышают **1 300 Па** – для **0.9%**.

*с учетом окружающей застройки:*

ж) максимальные значения расчетных положительных пиковых ветровых давлений достигают **1 169 Па**, не превышают **300 Па** для **62.4%** площади фасадов *тента*, находятся в диапазоне **300-600 Па** – для **22.3%**, находятся в диапазоне **600-900 Па** – для **14.8%**, превышают **900 Па** – для **0.5%**;

з) максимальные абсолютные значения расчетных отрицательных пиковых ветровых давлений достигают **2 728 Па** в локальных зонах на кровле, не превышают **300 Па** для

**56.8%** площади фасадов *тента*, находятся в диапазоне **300-500 Па** – для **30.3%**, находятся в диапазоне **500-900 Па** – для **12.1%**, превышают **900 Па** – для **0.8%**.

Случаи, учитывающие окружающую застройку, дают меньшие значения ветровых нагрузок и **не рекомендуются** к учёту при обосновании механической безопасности Объекта.

7. В силу сложной, нестандартной формы покрытий Объекта, при определении расчетных значений снеговых нагрузок применялся синтез нормативных рекомендаций (схемы Б.1, Б.5 и Б.8 Приложения Б к СП [2]) с результатами численного моделирования снегонакопления и физического моделирования снегопереноса с учетом и без учета окружающей застройки (раздел 7.2). Полученные с помощью такого подхода значения коэффициента формы  $\mu$  учитывают особенности сложной конструкции Объекта, отражают наиболее опасные для механической безопасности случаи распределения снегоотложений и, при этом, не противоречат положениям СП 20.13330.2016.

В прочностных расчетах Объекта **рекомендуется** использовать распределения расчетного коэффициента формы  $\mu$  в соответствии с рис. 7.1-7.12 и табл. 7.1 настоящего отчета.