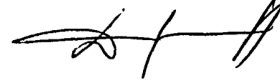


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



04201451784

*ДОРОШЕНКО Анна Валерьевна*

**МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
СКОРОСТЕЙ ВЕТРА И ПЕШЕХОДНОЙ КОМФОРТНОСТИ  
В ЗОНАХ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ**

Специальность: 05.13.18 –  
математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук, профессор  
*Варапаев Владимир Николаевич*

Москва - 2013

## Содержание

Введение .....	4
Глава 1. Современное состояние анализа пешеходной комфортности .....	9
1.1. Климатология города .....	9
1.2. Пешеходная комфортность и ее критерии .....	11
1.3. Анализ существующей отечественной и зарубежной нормативной базы .....	20
1.4. Натурные замеры скоростей ветра в пешеходных зонах городской застройки .....	30
1.5. Особенности моделирования задач пешеходной комфортности в аэродинамических трубах .....	32
1.6. Вычислительная аэрогидромеханика .....	32
1.7. Анализ возможностей программных комплексов применительно к расчетам пешеходной комфортности .....	34
1.8. Выводы по главе .....	35
Глава 2. Разработка методики численного моделирования скоростей ветра в пешеходных зонах жилой застройки. ....	37
2.1. Математическая формулировка задачи аэрогидродинамики .....	37
2.2. Моделирование турбулентности .....	38
2.3. Требования к геометрии расчетной области, начальные и граничные условия .....	45
2.4. Пространственно - временная дискретизация задач .....	48
2.5 Численное решение стационарных и нестационарных задач .....	56
2.6. Разработка методики моделирования зеленых насаждений .....	58
2.7. Выводы по главе .....	60
Глава 3. Программная реализация методики численного моделирования скоростей ветра в пешеходных зонах жилой застройки .....	61
3.1. Возможности и структура программного комплекса ANSYS CFD .....	61
3.2. Этапы расчета задач пешеходной комфортности в ANSYS CFD .....	61
3.3. Описание разработанной подпрограммы для дискретизации задач пешеходной комфортности .....	63
3.4. Описание программы критериальной оценки аэродинамической комфортности в пешеходных зонах .....	66

3.5. Выводы по главе.....	70
Глава 4. Верификация методики .....	71
4.1. Критерии выбора тестовых задач.....	71
4.2. Численное моделирование эксперимента по обдувке комплекса из двух зданий в аэродинамической трубе .....	72
4.3. Обтекание параллелепипеда .....	82
4.4. Моделирование живой изгороди .....	100
4.5. Численное моделирование эксперимента по продувке модели дерева в аэродинамической трубе.....	106
4.6. Выводы по главе.....	110
Глава 5. Практическое применение разработанной методики .....	112
5.1. Численное моделирование пешеходной комфортности на территории кампуса Технического университета г. Эйндховен .....	112
5.2. Численное моделирование пешеходной комфортности на территории строящегося торгового комплекса "Пулково аутлет" .....	138
5.3. Выводы по главе.....	156
Основные результаты и выводы.....	157
Список использованной литературы.....	159
Приложение .....	168

### Введение

Ветровой режим территории является одним из наиболее важных природных факторов, который необходимо учитывать при строительстве зданий и сооружений. Воздействие ветровых потоков в городской застройке может приводить к негативному изменению микроклиматических условий воздушной среды, а также способно служить источником возникновения неблагоприятных ситуаций. Это связано как с образованием зон застоя воздуха с повышенным уровнем загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха, так и с увеличением скорости ветровых потоков. Возрастающие потребности оценки рисков аэродинамического воздействия ветровых потоков определяются ростом числа высотных зданий и сооружений и плотности их размещения в крупнейших городах.

Традиционным методом оценки ветровой аэродинамики в окрестности комплексов зданий и сооружений сложной формы является экспериментальное исследование в аэродинамических трубах. Альтернативным подходом решения данных задач является численное моделирование движения воздушных потоков на ЭВМ, основанное на решении уравнений газодинамики. Данный метод обладает рядом преимуществ по сравнению с физическим экспериментом. В их числе, сокращение времени анализа, экономия средств, возможность получения более полной информации о распределении давлений по поверхности зданий и о полях скоростей вокруг них, возможность оперативного перебора различных вариантов форм проектируемых зданий для сравнительного анализа и оптимизации ветровой ситуации. Моделирование аэродинамических условий позволяет спрогнозировать возникновение неблагоприятных ситуаций в пешеходных зонах и предложить меры по их устранению или по снижению их вредного воздействия.

Поскольку основные исследования задач пешеходной комфортности в настоящее время проводятся за рубежом, разработка верифицированной методики численного моделирования скоростей ветра в пешеходных зонах жилой застройки позволит отечественным специалистам определять ветровые

воздействия в пешеходных зонах, как на стадии проектирования строительства, так и в существующей застройке. Представляется целесообразным разработку специализированной программы для критериальной оценки пешеходной комфортности по существующим российским и зарубежным методикам и нормам.

#### **Цели и задачи работы**

Целью работы является разработка, программная реализация и верификация методики численного моделирования скоростей ветра и пешеходной комфортности в зонах жилой застройки.

Для достижения поставленной цели решены **следующие задачи:**

- Анализ существующей отечественной и зарубежной нормативной базы критериев пешеходной комфортности и анализ результатов исследований приземных ветров в городской застройке.
- Разработка комплексной методики многоэтапного расчета задач определения ветровых воздействий в пешеходных зонах городской застройки.
- Разработка рекомендаций по выбору схем дискретизации, граничных и начальных условий, рациональных моделей турбулентности для решения данного класса задач.
- Разработка специализированной подпрограммы (макроса) для дискретизации расчетной области применительно к задачам пешеходной комфортности.
- Разработка алгоритма и программы, реализующих критериальную оценку аэродинамической комфортности в пешеходных зонах.
- Разработка методики моделирования зеленых насаждений, используемых для снижения ветровых воздействий в пешеходных зонах.
- Верификация разработанной методики численного моделирования задач пешеходной комфортности на основе сравнения результатов расчета с экспериментальными результатами физического моделирования в аэродинамических трубах и натурными измерениями.

- Применение разработанной методики и программы критериальной оценки аэродинамической комфортности в пешеходных зонах для существующего и строящегося объектов.

#### **Научная новизна работы:**

- Разработана и верифицирована комплексная методика численного моделирования скоростей ветра и пешеходной комфортности в пешеходных зонах жилой застройки, включающая рекомендации по выбору схем дискретизации, граничных и начальных условий, рациональных моделей турбулентности для решения данного класса задач.
- Оценка аэродинамической пешеходной комфортности по различным нормам и методикам реализована в разработанной проблемно-ориентированной программе.
- Разработана методика численного моделирования аэродинамики зеленых насаждений для оценки эффекта снижения ветровых воздействий на пешеходном уровне.

#### **Практическая значимость результатов исследования.**

- Разработанная методика численного моделирования задач пешеходной комфортности позволяет определять ветровые воздействия в пешеходных зонах, как на стадии проектирования, так и для существующей застройки.
- Разработанная программа позволяет проводить оценку пешеходной комфортности по существующим нормам и методикам (отечественным и зарубежным), определять и прогнозировать возникновение неблагоприятных ситуаций в пешеходных зонах городской застройки.
- Разработанная методика моделирования зеленых насаждений позволит адекватно учитывать их влияние на ветровые потоки в пешеходных зонах при численном решении задач пешеходной комфортности.
- Решенные тестовые задачи можно использовать при верификации программного комплекса ANSYS CFD согласно требованиям Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН).

**Внедрение результатов работы.**

Разработанные методика и программное обеспечение применяются в Научно-образовательном центре компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов (НОЦ КМ) МГСУ и ООО "АИКОМ".

**На защиту выносятся:**

- Методика численного моделирования скоростей ветра и пешеходной комфортности в зонах жилой застройки, включающая рекомендации по выбору схем дискретизации, граничных и начальных условий, рациональных моделей турбулентности для решения данного класса задач и специализированную подпрограмму (макрос) для дискретизации расчетной области.

- Программа, реализующая оценку аэродинамической пешеходной комфортности по различным нормам и методикам.

- Методика моделирования зеленых насаждений для снижения ветровых воздействий в пешеходных зонах.

- Результаты верификационных задач, решенных в обоснование достоверности и эффективности разработанной методики.

- Результаты исследования аэродинамической комфортности в пешеходных зонах кампуса Технического университета Эйндховен (Нидерланды), а также строящегося торгового комплекса «Пулково-аутлет» (г.Санкт-Петербург) по разработанной методике и оценка аэродинамической пешеходной комфортности с использованием разработанной программы.

**Достоверность полученных результатов обеспечивается:**

- использованием апробированных научных подходов к математическому моделированию задач аэродинамики, а также обоснованных численных методов решения соответствующих математических задач.

- использованием лицензионного программного комплекса ANSYS CFD.

- согласованием полученных результатов с экспериментальными исследованиями и натурными замерами для моделей и реальных застроек.

**Апробация работы.**

Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы», Москва, МГСУ, 2008, 2009гг.; Двенадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов, Москва, МГСУ, 2009г.; «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях», Москва, ВВЦ, 2009,2010гг.; Научно-технической конференции института фундаментального образования, Москва, МГСУ, 2009г.; Тринадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов. «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». Москва. МГСУ, 2010г.; Фундаментальные науки в современном строительстве», Москва, МГСУ, 2010, 2012гг.; Международной научной конференции «Интеграция, партнёрство и инновации в строительной науке и образовании», Москва, МГСУ, 2013.



## **Глава 1. Современное состояние анализа пешеходной комфортности**

### **1.1. Климатология города**

Климатология города, как самостоятельное направление в климатологии, начала развиваться около пятидесяти лет назад. Это возникновение связано, прежде всего, с изучением взаимодействия окружающей среды и городских структур в ходе антропогенного преобразования естественных природно-климатических условий на территориях городской застройки [27]. Одной из основных задач климатологии города является применение теории климата и климатообразования к городскому планированию и архитектуре. Взаимодействие климатологии города и градостроительства должно идти во встречных направлениях. С одной стороны, развитие городской среды приводит к изменению климатических условий, с другой стороны - климатические условия должны включаться в процесс принятия градостроительных и архитектурно-строительных решений.

Основными параметрами, описывающими климатологию города, являются интенсивность солнечной радиации, температура и влажность воздуха, направление и скорость ветра.

Информация о ветровом режиме местности включает в себя отдельные элементы метеорологии, микрометеорологии и климатологии. Ветровая метеорология описывает и объясняет основные характерные особенности атмосферных течений. Микрометеорология подробно описывает структуру атмосферных течений вблизи поверхности земли. Климатология, применительно к строительной аэродинамике, занимается прогнозированием ветровых условий.

Возникновение ветра (или движения воздуха), в основном вызывается переменностью нагрева солнцем поверхности Земли. Его непосредственной причиной является разница давления в точках, расположенных на одинаковой высоте над уровнем моря, что связано с термодинамическими и механическими

процессами, происходящими в неоднородной как по времени, так и в пространстве атмосфере.

В строительной практике для определения ветровых воздействий используется СНиП "Нагрузки и воздействия" [40]. Согласно этому документу для всей территории г.Москвы предполагается первый ветровой район и тип местности – пригород.

При оценке скоростей ветра в пешеходных зонах жилой застройки в диссертационной работе использовались более точные данные, данные метеостанций. Так, например, для задач города Москвы рекомендуется использовать данные метеорологической обсерватории им. В.А. Михельсона. Метеорологический архив этой обсерватории не имеет себе равных в Москве и по объему информации относится к числу наиболее значимых в России. Ценность его заключается в том, что за более чем 120-летнюю историю наблюдений накоплены сведения о погоде в Москве во всем многообразии ее проявлений, причем наблюдения проведены в одном месте, по единой методике, что обеспечивает их репрезентативность. Показания снимаются каждые три часа и заносятся в архив метеостанции. В разные годы в Москве было от 6 до 14 пунктов наблюдений за погодой, в настоящее время их осталось всего пять: три из них относятся к системе Гидрометслужбы - Балчуг, ВВЦ, Тушино (созданы в 1946-1948 гг.) и два ведомственных - обсерватории МСХА и МГУ (создана в 1954 г.). Метеообсерватория им. В.А. Михельсона расположена в Северном административном округе города Москвы на территории Московской сельскохозяйственной академии им. К.А.Тимирязева, в заповедной зоне Государственного заказника Петровское-Разумовское. Она окружена опытными полями и корпусами академии и Московского государственного агроинженерного университета им. В.П. Горячкина. Высота чаши барометра над уровнем моря - 163,4 м [34]. Таблица 1.1 отражает направление и повторяемость ветров на высоте 10 м (часов в год) по данным метеостанции им. В.А. Михельсона.

Таблица 1.1 — Направление и повторяемость ветров на высоте 10 м (часов в год) по данным метеостанции им. В.А. Михельсона (г.Москва).

Направление	Скорость ветра, м/с (в часах в год)								
	1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17
С	86,16	184,13	117,50	37,12	6,57	1,16	0,11	0,00	0,11
С-СВ	148,01	210,65	76,00	15,09	2,09	0,60	0,00	0,00	0,00
СВ	60,92	114,73	53,78	11,62	0,49	0,22	0,11	0,00	0,00
СВ-В	152,83	203,81	71,37	19,27	3,96	0,41	0,22	0,00	0,00
В	74,17	147,94	76,49	22,93	4,41	0,45	0,30	0,26	0,00
В-ЮВ	105,10	219,94	155,86	46,46	11,73	2,43	1,20	0,56	0,00
ЮВ	50,27	154,66	149,47	61,51	13,45	2,61	0,78	0,22	0,11
ЮВ-Ю	137,26	275,63	163,59	46,83	12,59	3,85	1,01	0,07	0,00
Ю	88,67	270,96	186,82	50,64	9,08	1,64	0,78	0,11	0,00
Ю-ЮЗ	191,49	407,47	238,13	54,49	10,72	1,68	0,26	0,04	0,00
ЮЗ	100,62	297,44	176,92	41,98	5,15	1,31	0,19	0,00	0,00
ЮЗ-З	195,18	389,47	184,20	34,44	5,27	1,01	0,00	0,07	0,00
З	92,59	292,81	162,17	41,49	8,89	1,79	0,22	0,07	0,00
З-СЗ	169,49	339,39	204,33	53,48	11,95	1,76	0,45	0,75	0,11
СЗ	64,39	197,35	155,29	65,32	16,47	5,23	1,90	0,34	0,00
СЗ-С	95,05	161,79	101,36	30,78	10,79	1,46	0,93	0,15	0,22

### **1.2. Пешеходная комфортность и ее критерии**

Пешеходная комфортность связана с такими параметрами как: интенсивностью солнечной радиации и теплового излучения конструкций зданий и рельефа местности, температурой и влажностью воздуха, направлениями и скоростями ветра. Основные закономерности изменения микроклиматических условий в городе приведены в таблице 1.2. [27].

Таблица 1.2 — Основные закономерности изменения микроклимата в городе.

Климатические характеристики	Закономерности формирования микроклимата (по отношению к загородным условиям)
Солнечная радиация	Снижение до 20% (в зависимости от загрязнения воздуха, времени года, высоты зданий и т.д.)
Температура воздуха	Повышение на 1-4 <sup>0</sup> С (в зависимости от плотности застройки, относительной площади искусственных покрытий и зеленых насаждений, условий проветриваемости и т.д.)
Скорость ветра	Снижение на 20-70% в среднем по территории (в зависимости от плотности застройки). Усиление порывистости ветра и

горизонтальных градиентов скорости.
Примечание: под плотностью застройки понимается отношение площади, занятой зданиями и сооружениями, к общей площади участка.

### 1.2.1. Тепловое воздействие на людей

Температура воздуха зависит от множества факторов, таких как:

- количество поступающей к поверхности земли солнечной радиации,
- поглощающие, отражающие и излучающие свойства подстилающей поверхности и предметов (зданий, сооружений) на ней расположенных,
- преобладающие типы атмосферной циркуляции,
- структура микромасштабной циркуляции, выделения техногенного тепла и т.д.

Наиболее ярко влияние урбанизации на климат прослеживается в образовании на территории городов устойчивых положительных аномалий температуры - «островов тепла». Их интенсивность зависит от площади и плотности застройки, ее теплотности, количества жителей, естественных природно-климатических условий. В общем случае, чем больше город, тем больше положительная аномалия температуры воздуха в нем. В климатическом выражении для малых и средних городов умеренной зоны контраст температуры город–пригород составляет величину  $1-2^{\circ}\text{C}$  в среднем за год. Для крупных и крупнейших городов, таких как Москва, интенсивность островов тепла увеличивается.

Тепловые ощущения на территории города при одной и той же температуре воздуха могут существенно различаться в зависимости от температуры окружающих человека поверхностей и скоростей ветра. Например, переходя в жаркий солнечный летний день на теневую сторону улицы, мы намного меньше страдаем от перегрева, хотя воздух на обеих сторонах улицы имеет примерно одинаковую температуру. Это происходит из-за того, что процесс теплообмена организма с окружающей средой зависит

не только от температуры воздуха, но и от радиационного баланса организма. На территории городской застройки за счет различной ориентации и экспозиции по освещенности элементов среды, а также различия их теплофизических свойств, таких как поглощающая и отражающая способность, их температура в солнечный день может существенно различаться. При сильном порывистом ветре температура ощущается ниже действительной.

### 1.2.2. Воздействие ветра

Воздействие ветра на людей может быть обусловлено как постоянным воздействием ветра, так и его порывами.

Сила ветра, действующая на человека, определяется по формуле:

$$F=0.5\rho U^2 C_D A_p \quad (1.1)$$

где  $A_p$  - площадь проекции, направленной по нормали к ветру ( $m^2$ ),  $C_D$  - коэффициент лобового сопротивления,  $U$  – скорость ветра на пешеходном уровне (1,75 м) (м / с).

А.Д. Пенварден [83] определяет  $A_f$  (площадь по ветру) и  $A_s$ , (площадь по направлению бокового ветра), как часть общей площади поверхности тела  $A_{Du}$ :

$$\begin{aligned} A_f/A_{Du} &= 0.326 \pm 0.022 (\pm 7\%) \\ A_s/A_{Du} &= 0.326 \pm 0.022 (\pm 7\%) \end{aligned} \quad (1.2)$$

Площадь  $A_{Du}$ , или общая площадь тела определяется по формуле:

$$A_{Du} = 0.0769(m \text{ g})^{0.425} h^{0.725} \quad (1.3)$$

где  $m$  - масса тела в кг и  $h$  высота тела в м. Типичное значение  $A_{Du}$  составляет около  $1,85 \text{ m}^2$ , при условии, что  $m = 70 \text{ кг}$ ,  $h = 1,75 \text{ м}$ . Типичные коэффициенты сопротивления около 1,15 для встречного ветра и около 1,0 для бокового ветра [83].

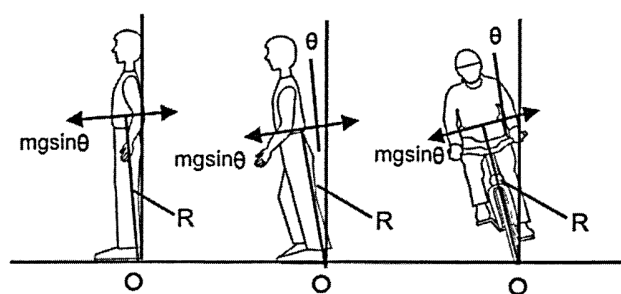


Рисунок 1.1 — Моменты силы ветра и силы тяжести: 1) на человека, стоящего прямо; 2) на человека, наклоняющегося из-за ветра; 3) на велосипедиста, наклоняющегося из-за ветра.

В сильный ветер, приходится наклоняться вперед или в сторону для того, чтобы сохранить равновесие (рисунок 1.1). Предполагая постоянным коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_D$ , равновесный угол определяется по формуле:

$$\theta = \arctan(0.5\rho U^2 C_D A_F / (mg)) \quad (1.4)$$

Уравнение 1.4 действительно для пешеходов и для велосипедистов (при боковом ветре). Исследования С. Мураками показали, что если поверхность земли достаточно жесткая, человек (стоя) может выдерживать постоянную скорость ветра до 30 м/с [80]. А.Д. Пенварден приводит пример человека, стоящего в стационарном ветровом потоке со скоростью 45 м/с ветра [5]. Равновесные углы  $27^\circ$  и  $43^\circ$  соответственно. Для пешеходов, равновесный угол  $\theta > 8^\circ$  ( $U > 15$  м/с) является потенциально нестабильным.

Механическое воздействие ветра на людей классифицируется категориями от штиля до сильного шторма. В 1806г. адмиралом Ф.Бофортом была разработана условная шкала для визуальной оценки скорости ветра по ее воздействию на предметы и на море. В 1963г. Всемирной метеорологической организацией данная шкала была адаптирована применительно к воздействию ветра на людей. Т.В. Лоусон и А.Д. Пенварден [72] представили расширенную таблицу "шкала Бофорта", отображающую влияние ветра на человека (таблица 1.3). Табличная скорость ветра является значением, которое измеряется на

пешеходной высоте ( $z = 1,75$  м) на открытой местности с аэродинамическими длинами шероховатости  $z_0$  от 0,03 м.

Таблица 1.3 — Шкала Бофорта.

Балл по шкале Бофорта	Описание ветра	Скорость ветра в м/с	Описание ветровых воздействий
0	Штиль	<0.4	Ветер не ощущается
1	Тихий ветер	0.4-1.5	То же
2	Легкий ветер	1.6-3.3	Обдувает лицо
3	Слабый ветер	3.4-5.4	Треплет прическу, одежду развевается; газету трудно читать
4	Умеренный ветер	5.5-7.9	Ветер поднимает пыль, сухой грунт и обрывки бумаги; волосы в беспорядке
5	Свежий ветер	8.0-10.7	Напор ветра ощущается всем телом; граница приятного ощущения ветра на суше
6	Сильный ветер	10.8-13.8	Зонтики используются с трудом; ветер сильно развевает волосы; трудно уверенно идти; шум от ветра в ушах неприятный
7	Близко к шторму	13.9-17.1	Возникают неудобства при ходьбе
8	Шторм	17.2-20.7	В большинстве случаев затруднено движение вперед; очень трудно удерживать равновесия при порывах ветра
9	Сильный шторм	20.8-24.4	Ветер сбивает людей с ног

Перечисленные эффекты ветра могут быть вызваны как порывами, так и постоянным ветром. Табличные скорости ветра  $U(10)$  усреднены за 10 минутный интервал. Скорость ветра на высоте 1,75 м составляет  $0,7*U(10)$ . Максимальный порыв на высоте 1,75 м (длительностью 3 сек.) в течение 10 минут составляет около  $1,1*U(10)$ .

Группа ученых под руководством С. Мураками провели обширное исследование воздействия ветра на людей [80, 81] см. таблицу 1.4. Насколько можно судить из этих субъективных оценок, влияние ветра на ходьбу хорошо согласуется с уравнением 1.4. Влияние ветра по расширенной шкале Бофорта как правило, более значимо при низких скоростях ветра, что связано с порывами ветра.

Таблица 1.4 — Ветровое воздействие на людей в потоке ветра; влияние на ходьбу, волосы/одежду/лицо. С.Мураками и др. (1980).

U(м/с)	Влияние ветра:
5 м/с	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Отсутствие влияния при ходьбе</li> <li>• Минимальное нарушение прически и трепыхание одежды</li> <li>• Обдувает лицо</li> </ul>
10 м/с	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Прогуливаться не так уж легко; шаг неровный; осанка не прямая</li> <li>• Влияние ветра</li> <li>• Прическа не в порядке; одежда развеивается; трудно удерживать зонтик</li> <li>• Ветер шумит; частое моргание глаз</li> </ul>
20 м/с	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Идти очень трудно, наклон тела вперед;</li> <li>• Очень сильное развеивание одежды</li> <li>• Невозможно идти лицом к ветру, боли в ушах, головные боли, трудно дышать</li> </ul>
25-33 м/с	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Невозможно стоять на ветру, сдувает.</li> </ul>

Аэродинамические условия вблизи зданий могут быть опасным из-за очень резких изменений в скорости и направления ветра. Резкое увеличение скорости ветра до 15 м/с и более может быть достаточным, чтобы вывести человека из равновесия.

С. Мураками [81] провел серию испытаний по изучению походки пешеходов в аэродинамической трубе. Когда люди проходили через поток сильного бокового ветра, вызванного открытием двери, были выявлены и измерены нарушения в походке. Для женщин отклонение составляло до 0,3 м при скорости ветра ( $U_{max}$ ) от 20 м/с. Наблюдаемое влияние ветра (т.е. нарушения походки) были примерно сопоставимы с влиянием ветра в однородном потоке со скоростью  $1,5 \cdot U_{max}$  или больше. Влияние ветра, как правило, незначительно для  $U_{max} < 10$  м/с.

Внезапного порыва может быть достаточно, чтобы человек потерял равновесие. Это определяется скоростью порыва ветра, размерами порыва и продолжительностью порыва, а так же временем реакции человека и положения его тела. Требуемая скорость порыва должна быть достаточно большой, чтобы поднять или сбить человека с ног. Что соответствует углу  $\theta$  (уравнение 1.4) от  $8^\circ$  и скорости порыва  $U_g > 15$  м/с.



Минимальная продолжительность порыва  $t_g$  (время, для которого скорость порыва примерно постоянна), может быть определена как  $x=0.5*(F/m)*t_g^2$ , где  $x$  - «критическое» перемещение тела человека (при котором человек теряет равновесие), а  $F/m$  - ускорение тела, вызванное действием ветра. Отсюда получим:

$$U_g t_g > \left( \frac{4xm}{\rho A_p C_D} \right)^{0.5} \quad (1.5)$$

Где  $x$  - расстояние, на которое центр тела должен был переместиться до начала 'перевеса'. Если  $U_g = 15$  м/с и  $x = 0,12$  м, то порыва  $t_g \approx 0,4$  с, достаточно, чтобы вывести человека из равновесия. Длину (или высоту)  $L_g$  над которой скорость порыва постоянна, можно оценить как  $L_g = U_g t_g$ . В данном случае  $L_g = 6$  м является достаточной, чтобы покрыть все тело.

Влияние порывов ветра на людей изучали несколько групп ученых: под руководством П.С.Джексона, под руководством С.Мураками, под руководством В.Н.Мельбуна и под руководством А.Д. Пенвардена.[69, 74, 81, 82]. Результаты всех исследований сведены в таблицу 1.5.

Таблица 1.5 — Влияние ветра на людей в зависимости от скорости порыва  $U_g$  и продолжительности порыва  $t_g$ . Данные взяты из М (В.Н.Мельбурн и др.), MU (С.Мураками и др.), JA (П.С.Джексон и др.) и В расширенная шкала Бофорта (А.Д. Пенварден) - порывы приведены для высот 1 м (MU), 1.75 м (В) и 2 м (JA).

$u_g$ (m/s)	$t_g$ (s)	автор	Влияние ветра
4	5	В/JA	Покачивание одежды
	5	В/JA	Волосы развиваются
7	1-10	В	Мусор и бумага поднимаются
	5	В/JA	Волосы в беспорядке
10	3	MU	Нерегулярные шаги; трудно контролировать ходьбу; чувство сухости глаз
	5	JA	Очень сильное развевание одежды
	10	JA	Замедление шага при встречном ветре
14	2	JA	Дуновение в сторону
	10	JA	Заметное замедление движение
15	2	Ур. 1.4	Люди могут быть выведены из равновесия порывами ветра
	3	MU	Трудно идти; опасно для пожилых людей
16	10	JA	Почти полная остановка
	10	JA	Неконтролируемая, шатающаяся походка
20	3	М	Серьезные трудности с равновесием в порывах
21	2	JA	Потеря равновесия; хватание за поддержку
23	3	М	Ветер сбивает людей с ног

Таким образом, порывы ветра меньше 4 м/с имеют незначительный эффект. Серьезное влияние ветра (при ходьбе) происходит при скорости порыва большей 8-10 м/с. Равновесие пешехода страдает при порывах от 15 м/с. Это может быть опасно для пожилых людей. Скорость порыва больше 20 м/с может быть опасна и для молодых людей. Сравнение таблиц 1.3 и 1.5 показывает, что влияние порывов ветра значительно сильнее, чем влияние устойчивого ветра с той же скоростью.

### 1.2.3. Частоты повторения ветров, вызывающих неприятные ощущения на застроенной территории.

Обозначим через  $V_0(V, \theta)$  — скорости ветра на высоте 10 м от поверхности земли для открытой местности, которые вызывают на уровне пешеходов для данного участка застроенной территории воздушные потоки со скоростью  $V$ , и через  $\theta$  — угол, определяющий направление вектора скорости  $V_0$ . Частоту повторения на рассматриваемом участке скоростей ветра, превышающих  $V$ , обозначим через  $f^V$ . Ее можно приближенно записать в виде

$$f^V = \sum_{i=1}^n f_i^{V_0} \quad (1.6)$$

где  $f_i^{V_0}$  — частоты повторения для открытой местности ветров со скоростями, превышающими  $V_0(V, \theta_i)$  и имеющие направления  $\theta_i = -\pi/n < \theta < \theta_i + \pi/n$ , причем  $\theta_i$  определяется в виде

$$\theta_i = \frac{2\pi i}{n} (i=1, 2, \dots, n) \quad (1.7)$$

На практике обычно пользуются 16-румбовым компасом, так что в выражениях (1.6) и (1.7)  $n = 16$ .

Для нахождения  $f^V$  необходимо сначала оценить значения  $V_0(V, \theta_i)$ , а затем из климатологических данных по ветру можно оценить частоты  $f_i^{V_0}$ .

Запишем скорость  $V_0(V, \theta_i)$  в виде

$$V_0(V, \theta_i) = \frac{1}{V/V_H(\theta_i)} \frac{V_0(\theta_i)}{V_H(\theta_i)} V \quad (1.8)$$

Отношения  $V_0(\theta_i)/V_H(\theta_i)$  характеризуют участок застройки с позиции микрометеорологии. Для стандартных условий шероховатости открытой местности эти отношения зависят от уровня  $H$  и условий шероховатости с наветренной от участка стороны. Отношения  $V/V_H(\theta_i)$  являются аэродинамическими характеристиками ветрового режима для данного участка и оцениваются на основе испытаний в аэродинамической трубе.

Исходная информация, используемая для проведения оценки повторяемостей  $f_i^{V_0}$ , обеспечивается записями скоростей и направлений ветра, которые проводятся метеорологическими станциями через каждые 3 ч и публикуются в Справочнике сводок по местным климатологическим данным. Рассмотрим, например, все подобные наблюдения, проводимые с трехчасовым интервалом в течение одного года (8 наблюдений/день  $\times$  365 дней = 2920 наблюдений), и предположим, что 58 из них относятся к северо-северо-западным ветрам со скоростями, превышающими 6 м/с. В таком случае частота повторения этих ветров может быть оценена следующим образом:

$$f_1^6 = \frac{58}{2920} \approx 2\% \quad (1.9)$$

Верхний индекс в  $f_1^6$  обозначает скорость  $V_0 = 6$  м/с, в то время как нижний индекс соответствует значению  $i = 1$  для 16-румбового компаса, в котором угол  $\theta$  измеряется против хода часовой стрелки, начиная с северо-северо-западного направления.

При решении практических задач желательно обосновывать оценки частот данными наблюдений за несколько лет. Это необходимо по двум причинам: во-первых, данные наблюдений за один год могут быть нерепрезентативными характеристиками ветровых климатических условий; во-вторых, наблюдения, проводимые с трехчасовым интервалом, дают мгновенные значения, которые бывают меньше или больше средних скоростей. Ошибка оценивания, связанная с такими различиями, невелика при большом объеме выборки.

Для некоторых прикладных исследований может представлять интерес проведение оценки повторяемости для отдельных времен года или для нескольких времен года (например, весна, лето и осень). В таких случаях единственными данными, используемыми для оценки повторяемости ветра, являются те, которые относятся к интересующему времени (или временам) года. Отметим к тому же, что действие ветра в период с 22 ч до 5 ч не представляет во многих случаях большого интереса с точки зрения комфорта пешеходов. В этом случае при оценке повторяемости ветров можно исключить наблюдения, проводимые в полночь и 3 ч. утра.

На метеорологической станции информация о частотах повторения скоростей ветра может быть представлена в виде диаграмм или таблиц [39].

#### **1.2.4. Другие параметры пешеходной комфортности.**

Другие микроклиматические параметры (например - абсолютная и относительная влажность воздуха) подвержены аналогичной изменчивости на территории городской застройки и влияют на теплоощущения людей, что приводит к неоднородности биоклиматической комфортности внутри городской застройки и необходимости ее оптимизации. Решение этого вопроса должно начинаться с физиологически обоснованного нормирования микроклиматических условий и разработки биоклиматических показателей, определяющих оптимальные, допустимые и экстремальные состояния микроклимата городской среды.

#### **1.3. Анализ существующей отечественной и зарубежной нормативной базы**

В СНиП "Нагрузки и воздействия" [40] на данный момент не существует никаких критериев пешеходной комфортности. Такие критерии описаны лишь в МДС 20-1.2006 «Временные рекомендации по назначению нагрузок и воздействий, действующих на многофункциональные высотные здания и комплексы в Москве» [26]. Согласно которым, в России условие комфортности пешеходных зон имеет вид:

$$T_c(V_{cr}) < T_{lm} \text{ при всех } V < V_{cr} \quad (1.10)$$

где  $V$  - скорость ветра в порыве на уровне 1,5 м;  $T_c$  - продолжительность появления скоростей ветра  $V$ , больше некоторого критического значения  $V_{cr}$ ;  $T_{lim}$  - предельное значение  $T_c$ .

Значения  $V_{cr}$  и  $T_{lim}$  для трех установленных уровней комфортности приведены в таблице 1.6

Таблица 1.6 — Критические скорости ветра  $V_{cr}$  (м/с) и предельная продолжительность  $T_{lim}$  (час/год) их появления.

Уровень комфортности	I	II	III
$V_{cr}$ , м/с	6	12	20
$T_{lim}$ , час/год	1000	50	5

Обычно при оценке комфортности пешеходных зон при скорости ветра  $V$  на характерной высоте  $z_c = 1,5$  м частота ее появления  $T_c$  определяется соотношениями:

$$T_c = \Delta T_m P(V > V_{cr}); \quad (1.11)$$

где  $\Delta T_m$  - интервал измерения скорости ветра  $V_m$  на метеостанциях; обычно  $\Delta T_m = 3$  час;  $P(V > V_{cr})$  - вероятность превышения скоростью критического значения  $V_{cr}$ .

Для определения вероятности  $P(V > V_{cr})$  скорость ветра  $V$  рассматривается как сумма средней  $V_m$  и пульсационной  $v'$  составляющих:

$$V(t) = V_m + v'(t) = V_m g(t), \quad (1.12)$$

$$g(t) = 1 + v'(t)/V_m. \quad (1.13)$$

Для каждого направления средняя скорость  $V_m$  рассматривается как случайная величина, характеризуемая своей функцией распределения. Пульсационная составляющая скорости обычно представляется как случайная функция с нормальным законом распределения. При этом существующие экспериментальные данные показывают, что  $v'(t)$  пропорциональна средней скорости ветра  $V_m$ . Тогда функция  $g(t)$ , которая может быть определена как функция порывистости, статистически не зависит от  $V_m$  и

$$P(V > V_{cr}) = \int_{V \geq V_{cr}} \varphi(V_m, g) dV_m dg = \int_0^\infty \varphi_m(V_m) \int_G \varphi_g(g) dg dV_m \quad (1.14)$$

где  $\varphi(V_m, g)$  - совместная плотность вероятности параметров  $V_m$  и  $g$ ;  $\varphi_m(V_m)$  и  $\varphi_g(g)$  – плотности вероятности случайной величины  $V_m$  и случайной функции  $g(t)$ , которые считаются статистически независимыми.

Область интегрирования  $G$  для внутреннего интеграла в (1.15) удовлетворяет условию

$$g \geq V_{cr}/V. \quad (1.16)$$

Плотность  $\varphi_m(V_m)$  распределения вероятности средней скорости  $V_m$  может быть определена на основе многолетних данных метеонаблюдений за распределением скоростей ветра.

Обычно метеорологическая информация представляется в виде числа регистрации скоростей ветра  $V_i$ , попадающих в некоторые фиксированные интервалы  $\Delta V_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ). Из соотношений (1.13), (1.15) и (1.16) следует, что в этом случае:

$$T_c = \Delta T_m \sum_i n_{\alpha, i} \Delta \tau(V_i) \quad (1.17)$$

$$\Delta \tau(V_i) = \int_{V_{cr}/V_{cr, ik}}^g \varphi_g(g) dg \quad (1.18)$$

где  $n_{\alpha, i}$  - число регистрации на метеостанции скоростей ветра  $V_i$  в течение года;  $\Delta \tau(V_i)$  - относительная продолжительность появления скоростей  $V_i$ ;  $g_{max}$  - максимальное значение функции порывистости  $g(t)$ .

Плотность распределения  $\varphi_m(V_m)$  функции порывистости и ее максимальное значение  $g_{max}$  определяются на основе результатов модельных испытаний площадки строительства в специализированных аэродинамических трубах.

В Еврокоде [57], на данный момент, не существует каких либо норм по оценке ветрового воздействия в пешеходных зонах. Официальные нормы по оценке пешеходной комфортности в Европе существуют лишь в Нидерландах, которые имеют название NEN 8100 [51]. Они основаны на дискомфортном пороге средней скорости ветра 5 м/с для всех видов деятельности. В зависимости от превышения с вероятностью  $P$  пороговой скорости ветра, данная

норма (код) определяет пять классов комфорта от А до Е (таблица 1.7). Эти классы соответственно для различных видов деятельности определяют качество хорошее, удовлетворительное или плохое.

Таблица 1.7 — Нормы NEN 8100 для оценки пешеходной комфортности.

Вероятность превышения скорости ветра $V=5\text{м/с}$ в % часов в год	Класс	Вид деятельности		
		Ходьба быстрая	Прогулка	Сидение на открытом воздухе
<2.5	А	хорошо	хорошо	хорошо
2.5-5.0	В	хорошо	хорошо	удовлетв.
5.0-10	С	хорошо	удовлетв.	плохо
10-20	Д	удовлетв.	плохо	плохо
>20	Е	плохо	Плохо	плохо

В Америке и Канаде (в частности фирмой RWDI) [19] используются нормы, основанные на исследованиях Т.В. Лоусона (таблица 1.8). В этих нормах шесть классов, которые соответствуют различным видам человеческой деятельности. Для каждого класса определяются два порога скорости ветра, зависящие от шкалы Бофорта: неприемлемый и допустимый.

Таблица 1.8 — Нормы для оценки пешеходной комфортности, разработанные Т.В. Лоусоном и используемые в RWDI.

Предписания использования		Пороговые значения скорости ветра и превышения	
Описание	Класс	Неприемлемый	Допустимый
Дороги и парковки	А	6%>B5	2%>B5
Быстрая ходьба	В	2%>B5	2%>B4
Прогулка	С	4%>B4	6%>B3

Стояние	D	6%>B3	6%>B2
Дверные проемы	E	6%>B3	4%>B2
Сидение	F	1%>B3	4%>B2

В таблице 1.8 в колонках пороговых значений скорости ветра и превышения указаны номера из шкалы Бофорта.

А.Ф.Е. Вайсом и А.Д. Пендварденом указываются следующие критерии, которые очень часто используют в своих исследованиях японские специалисты (таблица 1.9).

Таблица 1.9 — Нормы для оценки пешеходной комфортности, разработанные А.Ф.Е Вайсом и А.Д. Пендварденом и используемые японскими специалистами.

Скорость, м/с	Критерий
5	1
10	2
20	3

Следует отметить, что экспериментальные исследования И.С. Поултона, Дж.С.Р. Ханта и Дж. С. Мамфорда [67, 86] свидетельствуют о том, что комфорт пешеходов является функцией не только средней скорости ветра  $V$ , но также и его порывистости. По этой причине, вообще говоря, целесообразно изучать воздействие ветра на людей, используя эквивалентную (эффективную) скорость ветра  $V^e$ , которая определяется следующим образом:

$$V^e = V \left[ 1 + k \left( v'^{2/2} / V \right) \right], \quad (1.19)$$

где  $V$  – средняя скорость;  $v'^{2/2}$  – среднее квадратическое значение пульсаций продольной компоненты скорости;  $k$  – постоянная величина, характеризующая степень значимости воздействий пульсаций.



В соответствии с результатами этих исследований подходящее значение для этой постоянной будет  $k \approx 3$ . Однако другие исследователи используют значение  $k = 1,5$  (Н. Изюмов и А.Г. Давенпорт)[68] и  $k = 1$  (Дж. Гандемер) [62].

Из-за отсутствия официальных критериев в большинстве случаев решения о приемлемости комфортных условий в пешеходных зонах практически принимают сами застройщики.

Для ряда регионов вообще не может ставиться вопрос об оценке комфортности условий наружной среды, а гигиеническая и, соответственно, архитектурно-климатическая задача ставится исходя из оценки степени опасности погодных условий для здоровья и жизни человека. В связи с этим в практике обеспечения жизнедеятельности населения вне зданий разработаны и широко применяются индексы оценки экстремальности микроклиматических условий: индексы холодового стресса (обморожения) и теплового удара (перегрева).

Актуальность применения этих индексов в России, и в частности в Москве, отличающейся выраженной континентальностью климата очевидна, поскольку даже в странах с гораздо более мягким климатом перегрев и переохлаждение лидируют среди всех причин смертности, обусловленной погодными явлениями.

#### Ветровое охлаждение.

Ветровое охлаждение это восприятие снижения температуры воздуха ощущаемое телом на открытых участках кожи за счет потока холодного воздуха.

С ноября 2001 года в Канаде, США и Великобритании реализован индекс ветрового охлаждения, разработанный учеными и медицинскими экспертами Объединенной группы действий по индексам температуры [60]. Данный индекс определяется итерационными моделями температуры кожи при различных скоростях ветра и температуры с использованием стандартной корреляцией скорости ветра и интенсивности теплообмена. Теплоотдача была рассчитана для лица, встречного ветра на уровне 1,4 метра. Модель официально

корректирует измеренную скорость ветра на высоте лица, предполагая, что человек находится в открытом поле. Результаты этой модели можно приблизительно, с точностью до одного градуса, сформулировать в виде формулы

$$T_{wc} = 13.12 + 0.6215T_a - 11.37V^{+0.16} + 0.3965T_aV^{+0.16} \quad (1.20)$$

где  $T_{wc}$  - коэффициент ветрового охлаждения, основанный на температуре в Цельсиях,  $T_a$  - температура воздуха в Цельсиях,  $V$  - скорость ветра в километрах в час.

По этой карте (таблица 1.10) определяется период 5%-й вероятности наступления обморожения открытых участков кожи при их экспозиции к охлаждающим условиям.

Таким образом, некоторые сочетания отрицательных температур и скорости ветра, вызывающих обморожение открытых участков кожи, вполне характерны для погодных условий Российской Федерации. Поэтому при проектной подготовке применение этого индекса было бы эффективным в целях создания безопасных для здоровья микроклиматических условий. В первую очередь это касается территорий с длительным пребыванием человека рекреационных зон, территорий детских дошкольных учреждений и учреждений здравоохранения, мест производства работ на открытом воздухе (стройки, дорожные службы и др.).

Таблица 1.10 — Карта значений индекса ветрового охлаждения.

Скорость ветра (м/с)	Температура (С)																	
	4,4	1,7	-1,1	-3,9	-6,7	-9,4	-12,2	-15,0	-17,8	-20,6	-23,3	-26,1	-28,9	-31,7	-34,4	-37,2	-40,0	-42,8
2,2	4,9	2,0	-1,0	-4,0	-7,0	-9,8	-12,8	-15,8	-18,8	-21,8	-24,7	-27,7	-30,7	-33,7	-36,6	-39,6	-42,6	-45,6
4,5	3,6	0,6	-2,6	-5,7	-8,9	-11,9	-15,1	-18,2	-21,4	-24,5	-27,6	-30,7	-33,9	-37,0	-40,1	-43,2	-46,4	-49,5
6,7	2,8	-0,3	-3,6	-6,8	-10,1	-13,2	-16,4	-19,7	-22,9	-26,2	-29,3	-32,5	-35,8	-39,0	-42,2	-45,4	-48,7	-51,9
8,9	2,2	-1,0	-4,3	-7,6	-10,9	-14,1	-17,5	-20,8	-24,1	-27,4	-30,6	-33,9	-37,2	-40,5	-43,7	-47,1	-50,4	-53,7
11,2	1,7	-1,6	-4,9	-8,3	-11,7	-14,9	-18,3	-21,7	-25,1	-28,4	-31,7	-35,1	-38,4	-41,8	-45,1	-48,4	-51,8	-55,2
13,4	1,3	-2,0	-5,4	-8,9	-12,3	-15,6	-19,0	-22,4	-25,9	-29,3	-32,6	-36,0	-39,4	-42,8	-46,1	-49,6	-53,0	-56,4
15,6	0,9	-2,4	-5,9	-9,4	-12,8	-16,2	-19,6	-23,1	-26,5	-30,0	-33,3	-36,8	-40,3	-43,7	-47,1	-50,5	-54,0	-57,5
17,9	0,6	-2,8	-6,3	-9,8	-13,3	-16,7	-20,2	-23,7	-27,2	-30,7	-34,1	-37,6	-41,1	-44,6	-47,9	-51,4	-54,9	-58,4
20,1	0,3	-3,1	-6,6	-10,2	-13,7	-17,1	-20,7	-24,2	-27,7	-31,3	-34,7	-38,2	-41,7	-45,3	-48,7	-52,2	-55,8	-59,3
22,4	0,0	-3,4	-7,0	-10,5	-14,1	-17,5	-21,1	-24,7	-28,2	-31,8	-35,3	-38,8	-42,4	-45,9	-49,4	-53,0	-56,5	-60,1
24,6	-0,2	-3,7	-7,3	-10,9	-14,5	-17,9	-21,5	-25,1	-28,7	-32,3	-35,8	-39,4	-43,0	-46,5	-50,0	-53,6	-57,2	-60,8
26,8	-0,4	-3,9	-7,5	-11,2	-14,8	-18,3	-21,9	-25,5	-29,1	-32,7	-36,2	-39,9	-43,5	-47,1	-50,6	-54,2	-57,8	-61,4
Время обморожения				30 минут			10 минут			5 минут								

### Индекс теплового удара.

Для оценки совместного воздействия высокой температуры воздуха и его влажности на организм человека в мировой практике используется так называемый «индекс жары (heat index)» [60]. Индекс жары выражается в градусах температуры, которую ощущает человек, когда к тепловому воздействию на организм высокой температуры добавляется воздействие влажности воздуха. В качестве «опорного значения» индекса жары принята температура сухого воздуха при скорости его движения 0.2 м/с и менее. Для определения индекса жары используется «карта», составленная по данным экспериментальных исследований реакций и ощущений людей в климатических камерах (таблица 1.11). Для определения индекса в левой колонке находится значение фактической температуры, затем выполняется смещение по соответствующей строке до необходимого значения относительной влажности. Значение в найденной ячейке соответствует индексу жары.

Таблица 1.11 — Значения индекса жары при различных сочетаниях температуры и влажности воздуха и характер его воздействия на организм человека.

температура (°C) / относительная влажность	Значения теплового индекса															
	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	
43.3	40.6	42.2	44.4	47.2	50.6	54.4	58.3	61.7	66.1							
40.6	37.8	38.9	40.6	42.8	45.0	47.8	50.6	53.9	57.2	61.1	65.0					
37.8	35.0	36.1	37.2	38.3	40.0	41.7	43.3	46.1	48.9	52.2	55.6	57.8	62.2			
35	32.2	32.8	33.9	35.4	35.6	36.7	38.3	40.0	41.7	43.3	45.6	48.3	51.1	54.4	57.8	
32.2	29.4	30.0	30.6	31.1	32.2	32.8	33.9	35.0	35.6	36.7	37.8	38.9	41.1	42.8	45.0	
29.4	26.7	27.2	27.8	28.3	28.9	29.4	30.0	30.6	31.1	31.7	32.2	32.8	33.9	35.0	36.1	
26.7	23.9	24.4	25.0	25.0	25.6	26.1	26.1	26.7	27.2	27.2	27.8	28.3	29.4	30.0	30.0	
23.9	21.1	21.7	22.2	22.2	22.8	22.8	23.3	23.3	23.9	23.9	24.4	24.4	25.0	25.0	25.6	
Характер теплового воздействия																
Значение индекса жары	Возможное расстройство здоровья у чувствительной части населения															
54.5 и выше	Тепловой/солнечный удар															
40.5-54.5	Солнечный удар, спазмы сосудов от перегрева при длительном воздействии или физической активности имеют высокую вероятность															
32-40.5	Возможны солнечный удар, спазмы сосудов от перегрева при длительном воздействии или физической активности															
26.7-32	Возможно переутомление при длительном воздействии и/или физической активности															
При прямом солнечном воздействии значение индекса жары должно увеличиваться на 9.5°C																

#### **1.4. Натурные замеры скоростей ветра в пешеходных зонах городской застройки**

Для мониторинга ветровых воздействий в городской застройке чаще всего используются разнообразные метеостанции, которые могут быть аналоговыми и цифровыми, переносными и стационарными. Такая метеостанция измеряет все основные погодные показатели, такие как температура, давление и влажность воздуха. Конкретно для измерения скорости воздуха чаще всего используют анемометры, которые в свою очередь тоже различаются по своей конструкции и параметрам. Все анемометры по принципу действия чувствительных элементов можно классифицировать на заторможенные или динамометрические анемометры (трубки Пито - Прандтля); вращающиеся анемометры (чашечные, винтовые, крыльчатые); поплавковые анемометры; тепловые анемометры (термоанемометры); вихревые анемометры; ультразвуковые анемометры (акустические анемометры); оптические анемометры (лазерные, доплеровские анемометры). Помимо вышперечисленных устройств зачастую используются датчики давления для измерения скоростей ветра в определенных точках.

Для мониторинга атмосферного пограничного слоя в настоящее время существуют следующие системы: доплеровский содар и доплеровский радар.

Содары – системы, которые используются для дистанционного измерения структуры вертикальной турбулентности и профиля ветра в нижних слоях атмосферы. Большинство систем содаров работают, испуская за короткие промежутки времени акустический пульсирующий сигнал, и затем принимая отраженный сигнал. Который анализируется с целью определения скорости ветра, его направления и характеристик турбулентности атмосферы. Профиль атмосферы, как функция высоты, может быть получен путем анализа отраженного сигнала, который фиксируется приемным устройством после каждого переданного передатчиком импульса. Отраженный сигнал, который будет зафиксирован при любом времени задержки между передачей и приемом

(откликом) позволяет получить данные о состоянии атмосферы с распределением по высоте, зависящие от скорости распространения звука в различных средах.

Доплеровский радар - радар, который измеряет изменение частоты сигнала, отражённого от объекта. По изменению частоты вычисляется радиальная составляющая скорости объекта (проекция скорости на прямую, проходящую через объект и радар). Доплеровские радары могут применяться в самых разных областях: для определения скорости летательных аппаратов, кораблей, автомобилей, гидрометеоров (например, облаков), морских и речных течений, а также других объектов.

Впервые натурные замеры ветра проводились в Японии, что было связано с образованием зон сильных приземных ветров после начала строительства новых высотных зданий в районах с низкоэтажной застройкой. Район Синдзюку (часть Токио) в наше время один из наиболее престижных районов японской столицы (там расположен и дворец Императора) и он полностью застроен небоскребами (рисунок 1.2). Но, когда в середине 70 годов, после строительства первых из них, во всех прилегающих малоэтажных районах существенно изменились ветровые режимы (в худшую сторону), это широко обсуждалось общественностью. Потребовалось проведение множества дорогостоящих “организационных” мероприятий, вплоть до программы частичного переселения. Существовавшая на 1977 год застройка в 2001-2002 гг. была изучена в аэродинамической трубе Токийского университета, полученные скорости ветра сопоставляли с данными натурных замеров, проводившихся в 1975-1983 годах. Натурные замеры проводились с использованием чашечных анемометров [18, 101].



Рисунок 1.2 — Существующая застройка района Синдзюку.

### **1.5. Особенности моделирования задач пешеходной комфортности в аэродинамических трубах**

Традиционным методом оценки аэродинамики вблизи комплексов зданий и сооружений сложной формы являются экспериментальные исследования в аэродинамических трубах на моделях строящихся зданий.

В связи с тем, что критерии пешеходной комфортности определяются на высоте 1,5-2м над поверхностью земли для данного класса задач при моделировании в аэродинамических трубах датчики на модели нужно располагать в точках, соответствующих данной высоте. Кроме того, при решении задач пешеходной комфортности рассматриваются не давления на поверхности зданий, а воздушные потоки в пешеходных зонах, таким образом, при проведении модельных экспериментов для данного класса задач желательно использовать средства визуализации.

Испытания групп высотных зданий, даже в самых крупных трубах приходится проводить в масштабе 1:400 и даже 1:500. Соответственно, замеры скоростей ветра в пешеходных зонах приходится выполнять на высоте 3-4 мм, что обычно трудно реализуемо в связи со сложностью дренажа моделей на таком незначительном расстоянии от края.

Одним из лучших способов исследования в аэродинамических трубах скоростей ветра в пешеходных зонах является использования лазерного доплеровского анемометра, основным достоинством которого является возможность проводить измерения скорости без возмущения потока.

В настоящей работе рассмотрена возможность применения численного моделирования для решения подобных задач.

### **1.6. Вычислительная аэрогидромеханика**

Вычислительная аэрогидромеханика возникла в 1960х годах на стыке двух наук: вычислительной математики и теоретической аэрогидромеханики и к настоящему времени оформилась в самостоятельный раздел науки, предметом которого является численное моделирование различных течений жидкости и газа



и решение возникающих при этом задач при помощи методов, основанных на использовании электронных вычислительных машин [32].

Численное моделирование задач аэрогидромеханики ближе к экспериментальной, чем к теоретической аэрогидромеханике. Это связано с тем, что исследователь "включает" уравнения, а затем следит за тем, что происходит, то же самое делает и экспериментатор. Однако, исследователь, проводящий численный эксперимент имеет ряд преимуществ: задавать свойства жидкости (плотность, вязкость и др.); проводить чисто двумерный эксперимент (фактически не осуществимый в лабораторных условиях); задавать параметры течения (произвольно выбирать начальные толщину пограничного слоя и профиль скорости независимо от числа Рейнольдса на единицу длины числа Маха, что невозможно при экспериментах в аэродинамических трубах) и т.д. Численный эксперимент не может заменить ни физический эксперимент, ни теоретические исследования. Причины этого: первая - уравнения состояния сплошной среды нельзя считать точными и вторая – численный эксперимент дает дискретные результаты (впрочем, как и физический).

В основе численного моделирования задач гидрогазодинамики лежат как и уже ставшие классическими работы (А.Н. Колмогоров [21], П.Роуч [32], Ван Дайк [8], фон Карман [20], Л.Г.Лойцянский [24], Л.И. Седов[36], Г.Шлихтинг [44], А.Г. Давенпорт [52, 53] и др.), так и современные отечественные (М.Х. Стрелец [10, 45], А.В. Гарбарук [10], М.Л. Шур [10, 45], П.Г. Фрик [43], А.Н. Секундов [12], Е.М. Смирнов, С.А. Исаев [4, 5], А.Е. Усачов, И.К. Лифанов [22], О.М. Белоцерковский [7], С.В. Гувернюк [11], А.В. Атаманчук [1, 2], В.Я. Шкадов [3], В.Н. Варапаев [9], С.И. Дубинский [17], В.К. Ахметов [3] и др.) и зарубежные (P.R. Spalart [89], B.E. Launder [71], D. Spalding [71], L. Davidson [54], J. Ferziger [61], B.J. Guerts[65, 66], F.R. Menter [75-78] , A. Kareem [70], D.C. Wilcox [97, 98], T. J. Chung [50], A. Mochida [79, 94, 95], Y. Tominaga[79, 94, 95], B. Blocken [48] и мн. др.).

В последнее время достаточно много работ посвящено численному моделированию и разработке методик расчета ветровых воздействий, методик же учитывающих расчет на пешеходную комфортность единицы.

Одними из первых, в 2003 году, начала заниматься численным моделированием задач пешеходной комфортности группа ученых под руководством А. Мочиды (A. Mochida) в Японии на базе Архитектурного Института Японии (AIJ) [79, 94, 95] ; чуть позже в 2007 году группа из европейских специалистов, под руководством Дж. Франке [63,64] и Б. Блокена [48] в рамках проекта COST также начала заниматься численным моделированием задач пешеходной комфортности. В 2010 г. С.И. Дубинский в диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук описал методику численного моделирования ветровых воздействий на высотные здания и комплексы, которая позволит проводить оценку пешеходной комфортности согласно МДС 20-1.2006 «Временные рекомендации по назначению нагрузок и воздействий, действующих на многофункциональные высотные здания и комплексы в Москве» [26].

#### **1.7. Анализ возможностей программных комплексов применительно к расчетам пешеходной комфортности**

В настоящее время существует множество программных комплексов для решения задач вычислительной гидрогазодинамики. К таким программным комплексам (ПК) можно отнести универсальные коммерческие ПК Ansys CFD, FlowVision, Star-CD, Phoenics, CFD-ACE, NUMECA и др.; универсальные некоммерческие ПК FDS, OpenFOAM и др.; специализированные ПК WindSim, Virtual Wind; исследовательские программные комплексы Miscom, VP2/3.

Для решения задач пешеходной комфортности применяемый программный комплекс должен поддерживать турбулентные течения, стационарные и нестационарные потоки, модели идеального и реального газа, шероховатость стенок. Также в нем должен быть реализован широкий спектр моделей

турбулентности и решатель должен базироваться на конечно-объемной дискретизации уравнений.

В результате анализа современных программных комплексов и опыта расчета ветровых воздействий было получено, что лишь в наиболее мощных и распространенных коммерческих ПК применяется метод контрольных (конечных) объемов и реализован широкий спектр моделей турбулентности. К таким ПК можно отнести Ansys CFD, Star-CD, Phoenix.

Следует отметить, что программный комплекс Ansys CFD является лидером на рынке коммерческих CFD комплексов, и большое количество серьезных промышленных и исследовательских работ было выполнено с его использованием.

В связи с тем, что в настоящее время не существует рекомендаций для численного решения задач пешеходной комфортности, представляется целесообразным разработка, программная реализация, верификация и апробация методики численного моделирования скоростей ветра и пешеходной комфортности в зонах жилой застройки.

#### **1.8. Выводы по главе**

1. Определением принципов и критериев пешеходной комфортности занимались такие специалисты, как А.Д. Пенварден, А.Ф.Е. Вайс, П.О. Фангер, С. Мураками, Т.В. Лоусон, П.С. Джексон, В.Н. Мельбрун, Э.И. Реттер, И.С. Поултон, Дж.С.Р. Хант, Дж. С. Мамфорд, Н. Изюмов, А.Г.Давенпорт, Дж. Гандемер, С.И. Стриженов, Ф.Л. Серебровский, Н.А. Попов, Н.М. Томсон. Именно результаты их исследований были взяты в основу норм, как отечественных, так и зарубежных.

2. Обзор и анализ современных отечественных и зарубежных нормативных документов и методик для пешеходной комфортности в городской застройке показал, что они нуждаются в уточнении и дополнении, особенно в части учета видов деятельности при пребывании на открытых площадках, вероятности возникновения критических скоростей ветра, выбора величин таких скоростей.

3. Рассмотрены особенности моделирования задач пешеходной комфортности в аэродинамических трубах и натурных замеров скоростей ветра в пешеходных зонах городской застройки.

4. Изучены основные достижения в области вычислительной аэрогидродинамики в целом, рассмотрены как классические работы (А.Н. Колмогоров, П. Роуч, Ван Дайк, фон Карман, Л.Г. Лойцянский, Л.И. Седов, Г.Шлихтинг, А.Г. Давенпорт и др.), так и современные отечественные (М.Х. Стрелец, А.В. Гарбарук, М.Л. Шур, П.Г. Фрик, А.Н. Секундов, Е.М. Смирнов, С.А. Исаев, А.Е. Усачов, И.К. Лифанов, О.М. Белоцерковский, С.В. Гувернюк, А.В. Атаманчук, В.Я. Шкадов, В.Н. Варапаев, С.И. Дубинский, В.К. Ахметов и др.) и зарубежные (P.R. Spalart, B. Launder, D. Spalding, L. Davidson, J. Ferziger, B.J. Guerts, F. Menter, A. Kareem, D.C. Wilcox, T.J. Chung, A. Mochida, Y. Tominaga, B. Blocken и мн. др.).

5. Приведен анализ возможностей ведущих программных комплексов применительно к расчетам пешеходной комфортности, таких как ANSYS CFD, STAR-CD, PHOENICS, OpenFOAM и др.

6. Обоснована необходимость создания и программной реализации методики численного моделирования задач пешеходной комфортности.

## Глава 2. Разработка методики численного моделирования скоростей ветра в пешеходных зонах жилой застройки.

### 2.1. Математическая формулировка задачи аэрогидродинамики

В гидрогазодинамике можно выделить три направления: теоретическая гидрогазодинамика, экспериментальная гидрогазодинамика, вычислительная гидрогазодинамика.

В вычислительной гидрогазодинамике расчеты ветровых потоков сводятся к решению системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих движение вязкой жидкости. Система состоит из двух уравнений: уравнения движения и уравнения неразрывности.

В векторном виде для несжимаемой жидкости она записывается следующим образом:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0$$

Здесь  $\Delta$  – оператор Лапласа,  $\nabla$  – оператор Гамильтона,  $p$  – давление,  $t$  – время,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости для воздуха,  $\rho$  – плотность,  $\vec{v}$  – векторное поле скоростей,  $\vec{f}$  – векторное поле массовых сил.

Для упрощения моделирования массовые силы не учитываются и система принимает вид:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Здесь  $u, v, w$  – искомые компоненты вектора скорости (по осям  $x, y, z$ ),  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости.

Уравнения Навье-Стокса для сжимаемой жидкости образуют смешанную систему гиперболически-параболических уравнений, а для несжимаемой жидкости – эллиптически-параболических. Поэтому в этих двух случаях используются разные численные методы решения.

## 2.2. Моделирование турбулентности

В настоящее время вопрос моделирования турбулентных потоков остается открытым. Существующие на данный момент модели турбулентности условно можно разделить на 4 группы [10]:

### 1. Прямое численное моделирование DNS (Direct Numerical Simulation).

Данный подход максимально строгий из существующих, так как здесь непосредственно решаются трехмерные нестационарные уравнения Навье-Стокса на сетке с шагами (включая шаг по времени) достаточно малыми для точного разрешения всех турбулентных вихрей. Шаг сетки в данной модели должен быть порядка колмогоровского масштаба  $\eta_k=(\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$ .

Зависимость количества узлов сетки в одном направлении от числа Рейнольдса можно оценить следующим образом:  $N \sim L/\eta_k \sim \nu^{-3/4} \sim Re^{3/4}$ . Очевидно, что в ближайшей перспективе применение прямого численного моделирования для решения прикладных задач не возможно, в связи с высокими требованиями к сетке.

В связи с вышесказанным область применения данного метода на практике: расчет простых турбулентных течений при низких (порядка единиц на  $10^3$  и ниже) числах Рейнольдса.

### 2. Метод моделирования крупных вихрей LES (Large Eddy Simulation).

Данный метод "фильтрует" поток от коротковолновых турбулентных неоднородностей. Длинноволновые турбулентности разрешаются точно, а мелкомасштабные турбулентности моделируются.

Процедура фильтрации произвольной функции  $f$  состоит в ее умножении на функцию фильтра и интегрировании полученного результата по всему объему.

Отфильтрованные значения функции  $f$  можно представить следующим

образом:

$$\bar{f}(r, t) = \int_V G(r, r') f(r', t) dr'^3, \quad f = \bar{f} + f'$$

где  $G(r, r')$  - функция фильтра,  $r$  - координата рассматриваемой точки потока,  $f$  - фактуальное значение функции, а  $\bar{f}$ ,  $f'$  - отфильтрованное и пульсационное значения соответственно.

При использовании данного метода предъявляются следующие требования к расчетной сетке: у стенок она должна быть достаточно мелкой, в связи с тем, что при приближении к ней характерный размер вихрей уменьшается.

Таким образом, моделирование крупных вихрей связано с высокими вычислительными затратами (хоть и меньшими по сравнению с прямым численным моделированием).

### 3. Применение уравнений Рейнольдса, замкнутых при помощи моделей турбулентности RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes).

При осреднении по времени нестационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса получим систему уравнений Рейнольдса.

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \\ \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \end{cases}$$

Процедура осреднения выглядит следующим образом:

$$\bar{a}(t) = \frac{1}{2T} \int_{t-T}^{t+T} a(\tau) \cdot d\tau.$$

Полученная система является не замкнутой, в нее входит тензор рейнольдсовых напряжений  $\tau_{ij}^T = \rho \overline{u'_i u'_j}$ . Замыкание этой системы производится с помощью различных полуэмпирических моделей турбулентности.

Эти полуэмпирические модели условно можно классифицировать на две группы: модели, опирающиеся на гипотезу Буссинеска и модели рейнольдсовых напряжений. Первую группу в свою очередь можно классифицировать по количеству дифференциальных уравнений переноса: алгебраические модели

турбулентности, модели с одним дифференциальным уравнением, модели с двумя дифференциальными уравнениями.

Гипотеза Буссинеска

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_T \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} = 2\nu_T \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \text{ (несжимаемая жидкость)}$$

Таким образом, при использовании гипотезы Буссинеска вместо поля тензора из шести компонент используется поле одной скалярной величины и уравнения Рейнольдса принимают вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \\ \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \mu_T) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \end{cases}$$

Сумму молекулярной и турбулентной вязкостей называют эффективной вязкостью.

Алгебраические модели турбулентности не содержат дифференциальных уравнений, построены на закономерностях, характерных для тех или иных «канонических» течений (пограничный слой, струя, слой смешения) и имеют простую формулировку и реализацию. При этом они совершенно не универсальны и в настоящее время практически не используются. Наиболее известные алгебраические модели: модель Себеси-Смита и модель Болдуина-Ломакса.

Для алгебраических моделей турбулентности турбулентная вязкость определяется алгебраической формулой, тогда как в дифференциальных моделях турбулентности записывается уравнение переноса турбулентных характеристик (таких как турбулентная вязкость, кинетическая энергия турбулентности и т.д.), которое можно представить в следующем виде:

Конвекция=Диффузия+Генерация-Диссипация.

Модели с одним дифференциальным уравнением можно условно разделить на модели, в которых дифференциальное уравнение записано относительно турбулентной вязкости (или связанной с ней величиной) и на модели



относительно других турбулентных характеристик.

В случае определения турбулентной вязкости используется упрощенная гипотеза Буссинеска  $-\overline{u'_i u'_j} = 2\nu_T \cdot S_{ij}$ .

В настоящее время на практике наиболее часто используются модели относительно турбулентной вязкости Спаларта-Аллмареса и Секундова.

Модели с двумя уравнениями используют второе дифференциальное уравнение для диссипации. Модели этого семейства широко применяются на практике, т.к. представляют собой разумный компромисс между точностью решения и вычислительной сложностью его получения.

Рассмотрим модели турбулентности, которые будут использоваться в данной работе.

#### Модель турбулентности k-ε

$k$  - (кинетическая энергия турбулентности) определяется как сумма квадратов пульсационных составляющих скорости (имеет размерность  $\frac{m^2}{c^2}$ ).  $\varepsilon$  - коэффициент диссипации турбулентных вихрей и имеет размерность  $\frac{[k]}{c} = \frac{m^2}{c^3}$ .

Модель k-ε основана на следующем предположении  $\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$ , где  $C_\mu = 0.09$  подобранная эмпирическим путем константа.

Значения  $k$  и  $\varepsilon$  определяются непосредственно из уравнений переноса (для случая несжимаемой жидкости):

$$\rho \left( \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j k) \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon$$

$$\rho \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \varepsilon) \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon)$$

где  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ . - эмпирически подобранные константы модели, член

$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.2)$$

отвечает за генерацию турбулентности.

Помимо классической  $k$ - $\varepsilon$  существуют и другие модели, построенные по тому же принципу (из представленных в данной работе можно назвать RNG  $k$ - $\varepsilon$ ).

Модель RNG  $k$ - $\varepsilon$  основана на ренормализованном групповом анализе уравнений Навье-Стокса. Данная модель отличается от модели  $k$ - $\varepsilon$  тем, что у нее другая константа  $C_{\varepsilon 1}$  и уравнение движения принимает вид:

$$\rho \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \varepsilon) \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1 RNG} P_k - C_{\varepsilon 2 RNG} \rho \varepsilon),$$

$$\text{где } C_{\varepsilon 1 RNG} = 1.42 - f_\eta, f_\eta = \frac{\eta(1-\frac{\eta}{4.38})}{1+\beta_{RNG} \eta^3}, C_{\varepsilon 2 RNG} = 1.92, \beta_{RNG} = 0.012$$

#### Модель турбулентности $k$ - $\omega$

Модель типа  $k$ - $\omega$  была впервые предложена Вилкоксом, поэтому ее еще иногда называют  $k$ - $\omega$  моделью Вилкокса. Одно из преимуществ моделей  $k$ - $\omega$  состоит в более простой обработке пристеночных течений. Эта модель, в отличие от  $k$ - $\varepsilon$  моделей, не требует использования сложных демпфирующих функций в пристеночной области.

Модели этого семейства основаны на предположении

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}, \quad (2.3)$$

где  $\omega$  - частота турбулентных пульсаций.

Для замыкания системы уравнений гидродинамики, осредненных по Рейнольдсу вводятся два уравнения переноса

$$\rho \left( \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j k) \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega$$

$$\rho \left( \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \omega) \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2$$

где  $\beta' = 0.09$ ,  $\alpha = \frac{5}{9}$ ,  $\beta = 0.075$ ,  $\sigma_k = 2$ ,  $\sigma_\omega = 2$  - константы модели, подобранные эмпирически,  $P_k$  вычисляется по формуле (2.2).

### Модель турбулентности BSL k- $\omega$

Одним из недостатков модели Вилкокса является ее сильная чувствительность к граничным условиям на входе. Меняя значения  $\omega$  на входе, можно получить большой разброс результатов, что нежелательно. Ментер предложил использовать k- $\omega$  модель около поверхности и k- $\epsilon$  в остальной части расчетной области с осуществлением гладкого перехода между ними. Для этого в уравнениях модели k- $\epsilon$   $\epsilon$  заменяется его выражением через k и  $\omega$  ( $\epsilon = \beta k \omega$ ), затем уравнения k- $\omega$  модели умножаются на  $F_1$ , а модифицированные уравнения K- $\epsilon$  модели на  $1 - F_1$ .  $F_1$  полагается равным 1 на границе расчетной области и убывает по мере удаления от границы таким образом, что становится равным 0 на границе пограничного слоя.

Преобразованные уравнения модели k- $\epsilon$ :

$$\rho \left( \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j k) \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_{k2}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \beta' k \omega$$

$$\rho \left( \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \omega) \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_{\omega 2}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_2 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_2 \rho \omega^2$$

где  $P_k$  вычисляется по формуле (2.2),  $\eta_t$  по (2.3)

Уравнения модели k- $\omega$ :

$$\rho \left( \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j k) \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_{k1}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega$$

$$\rho \left( \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \omega) \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_{\omega 1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha_1 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_1 \rho \omega^2$$

где  $P_k$  вычисляется по формуле (2.2),  $\eta_t$  по (2.3)

После умножения на  $F_1$  и  $1 - F_1$  соответственно получаем

$$\rho \left( \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j k) \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega$$

$$\rho \left( \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \omega) \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2$$

где  $\beta' = 0.09$ ,  $\sigma_{k1} = 2$ ,  $\beta_2 = 0.0828$ ,  $\alpha_1 = \frac{5}{9}$ ,  $\beta_1 = 0.075$ ,  $\sigma_{k1} = 2$ ,  $\sigma_{\omega 1} = 2$ ,  $\alpha_2 = 0.44$ ,  $\beta_2 = 0.0828$ ,  $\sigma_{k2} = 1$ ,  $\sigma_{\omega 2} = 1/0.856$ ; коэффициенты с индексом 3 вычисляются как линейная комбинация соответствующих коэффициентов для каждой из моделей по формулам вида

$$\xi_3 = F_1 \cdot \xi_1 + (1 - F_1) \cdot \xi_2$$

Функция перехода  $F_1$  имеет вид:

$$F_1 = th(arg_1^4), \text{ где } arg_1 = \min \left( \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{CD_{k\omega} \cdot \sigma_{\omega 2} \cdot y^2} \right) \quad (2.4)$$

где  $y$  – расстояние до ближайшей стенки,  $\nu$  - кинематическая вязкость;

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 1.0 \cdot 10^{-10} \right).$$

#### Модель турбулентности SST (Shear Stress Transport)

Модель BSL  $k$ - $\omega$  сочетает в себе преимущества модели Вилкокса и  $k$ - $\epsilon$ , но не дает удовлетворительного решения для течений с отрывом потока. Как было показано Менгером, это связано в первую очередь с тем, что обе модели, на которых она построена не учитывают перенос турбулентных касательных напряжений, что приводит к переоценке турбулентной вязкости. Для устранения этого недостатка в модели SST, уравнения которой также, как и для BSL  $k$ - $\omega$  построены из уравнений  $k$ - $\omega$  и  $k$ - $\epsilon$ , вводится ограничитель турбулентной вязкости:

$$\mu_t = \frac{\alpha_1 k \rho}{\max(\alpha_1 \omega, S \cdot F_2)}$$

где  $F_2$  - переходная функция, которая действует подобно  $F_1$ , обеспечивая применение ограничителя только в пределах пограничного слоя (предположения, на которых он основан, физически некорректны за пределами этого слоя),  $S$  - инвариантная мера интенсивности напряжений.

Используется та же переходная функция  $F_1$ , что и в BSL модели (см. (2.4)), вторая переходная функция  $F_2$  имеет вид:

$$F_2 = th(arg_2^2), \text{ где } arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta'\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right)$$

#### Модели рейнольдсовых напряжений

Когда гипотеза Буссинеска неверна, используются модели рейнольдсовых напряжений, учитывающие анизотропию тензора рейнольдсовых напряжений. Эти модели можно разделить на три группы: дифференциальные модели рейнольдсовых напряжений (DRSM); алгебраические модели рейнольдсовых напряжений (ARSM); явные алгебраические модели рейнольдсовых напряжений (EARSM).

В целом все модели рейнольдсовых напряжений применимы к различным течениям в отличие от моделей турбулентной вязкости, но при этом они их сложнее и имеют ряд проблем как вычислительного характера.

4. Гибридные методы. Помимо рассмотренных трех методов моделирования турбулентных течений разрабатывается ряд промежуточных, гибридных методов, сочетающих в себе те или иные элемент RANS, LES и DNS. В настоящее время самым распространенным из гибридных методов является метод отсоединенных вихрей DES (Detached Eddy Simulation), в котором сочетается RANS (в области присоединенного пограничного слоя) с LES (в области отрыва).

### **2.3. Требования к геометрии расчетной области, начальные и граничные условия**

На результаты численного моделирования задач внешней аэродинамики влияет большое количество факторов, в частности выбор расчетных переменных, модель турбулентности, размеры расчетной области, начальные и граничные условия, расчетная сетка, численная аппроксимация, критерии сходимости итерационного процесса, детализированность застройки, шаг по времени и т.д.

Сформулируем основные требования к геометрии расчетной области, начальным и граничным условиям задач пешеходной комфортности.

Начальным этапом является выбор размеров расчетной области. Заметим, что в настоящее время в России нет определенных норм для численного моделирования задач внешней аэродинамики, однако в Архитектурном институте Японии AIJ (Токио) рабочей группой под руководством Я.Томинага, А. Мочиды, Р. Йоши, Х.Катаока и др. были сформулированы некоторые рекомендации для численного моделирования задач связанных с пешеходной комфортностью вокруг зданий [95].

В частности, при определении размера расчетной области, они пользуются понятием "блокировка" (В), которое введено для проведения экспериментов в аэродинамических трубах и равно отношению площади поперечного сечения здания к площади поперечного сечения расчетной области. Это отношение должно не превышать 3%. Также рекомендуются следующие размеры расчетной области: боковая граница более 5Н от крайней точки застройки (где Н – размер самого высокого здания), более 10Н с заветренной стороны, высота области 5Н и 5Н – расстояние по потоку до застройки. При численном моделировании задач пешеходной комфортности для одного - трех зданий будем использовать данные рекомендации.

Рабочая группа AIJ рекомендует детально моделировать область вокруг интересующей застройки радиусом 1-2Н, а также упрощенно моделировать по крайней мере одну улицу в каждом направлении для учета влияния на ветровые потоки существующей застройки.

В методике численного моделирования ветровых воздействий на высотные здания и комплексы, описанной в диссертационной работе С.И. Дубинского [17], предлагается рассматривать область радиуса 1-3 км (в зависимости от рельефа и высоты зданий) и высотой до 1 км. Эти рекомендации будем использовать при численном моделировании пешеходной комфортности для группы заданий.

#### Граничные и начальные условия.

Выбор граничных и начальных условий является одной из наиболее важных задач при численном моделировании.

Для задач численного моделирования пешеходной комфортности на входе задаются средние скорости, которые, как правило, получают по нормам (нами используется аппроксимация данных СНиП или МДС). Если известны данные замеров для профиля скорости, турбулентной кинетической энергии, диссипации, интенсивности турбулентности, то они непосредственно могут быть заданы на входе в модель.

Рассмотрим рекомендации для условий на входе, разработанные АИ.

Профиль скорости набегающего потока по высоте задается степенным законом:

$$U(z) = U_S \left( \frac{z}{z_S} \right), \text{ где } U_S \text{ - средняя скорость на высоте } z_S.$$

Профиль распределения кинетической энергии турбулентности по высоте может быть получен из экспериментальных данных (аэродинамическая труба, натурные испытания), если такие данные отсутствуют, то рекомендуется задать уравнение для интенсивности турбулентности в следующем виде:

$$I(z) = \frac{\sigma_u(z)}{U(z)} = 0.1 \left( \frac{z}{z_G} \right)^{(-\alpha-0.05)}, \text{ где } z_G \text{ - высота пограничного слоя, } \alpha \text{ -}$$

показатель степенного закона.

Тогда кинетическую энергию турбулентности можно определить, как:

$$k(z) = \frac{\sigma_u^2(z) + \sigma_v^2(z) + \sigma_w^2(z)}{2} \cong \sigma_u^2(z) = (I(z)U(z))^2$$

Следует проследить, чтоб заданный профиль ветра не изменялся бы вплоть до достижения центральной зоны модели. В качестве теста, рекомендуется "продувать" модель без застройки при той же подробности сетки.

На стенках рекомендуется задавать условия прилипания. Существует несколько видов условий прилипания. При моделировании задач пешеходной комфортности задается условие "no slip". Это наиболее распространенный тип условия прилипания на стенках для реализации граничных условий. В этой

модели предполагается, что скорость воздуха непосредственно на стенке равна нулю  $U_{WALL} = 0$ .

На "выходе" из области и "внешних" границах применяются граничные условия, обеспечивающиеся постоянным статическим давлением. В этом случае формируется однородный поток за счет минимизации производных всех переменных.

В зоне застройки по необходимости задаются условия "шероховатости".

Обобщая выше сказанное, следует отметить, что граничные и начальные условия задаются в каждой задаче индивидуально. Так, например, при воспроизведении эксперимента в аэродинамической трубе нужно задавать шероховатость рабочей части трубы, все замеренные величины на "входе" (если эксперимент проходил в трубе с закрытой рабочей частью, то на верхней границе модели нужно задавать условия "стенки"); при численном расчете задач, для которых проводились натурные замеры, необходимо задать все условия на "входе", которые замерялись в "натуре"; при численном расчете задач, для которых не проводилось никаких экспериментов, необходимо максимально детально задавать саму модель, а именно близлежащие улицы, рельеф местности, зеленые насаждения, а также использовать всю доступную информацию для реального ветрового режима в данном районе и т.д.

Масштаб турбулентности в соответствии с рекомендациями Еврокода в задачах равен 200-300м [57].

#### 2.4. Пространственно - временная дискретизация задач

В настоящее время для задач гидрогазодинамики используются различные методы дискретизации, в частности метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод дискретных вихрей, метод конечных (контрольных) объемов (МКО). Для решения задач пешеходной комфортности был выбран МКО, основным достоинством которого является возможность применения неструктурированных сеток для дискретизации уравнений гидрогазодинамики. Отметим, что как показывает практика, большинство гидродинамических пакетов,



таких как ANSYS CFD, CFD-ACE, STAR-CD, FINE (NUMECA) используют МКО, основным достоинством которого является возможность применения неструктурированных сеток для дискретизации уравнений гидрогазодинамики.

Процесс дискретизации дифференциального уравнения подразумевает переход от области непрерывного изменения аргумента к области дискретного его изменения. Для этого расчетную область разбивают на некоторое конечное множество ячеек, образующих сетку [35, 41]. Внутри ячеек размещают точку, называемую узлом ячейки. Существует два основных способа расположения точек интегрирования: I) точки интегрирования располагаются в узлах ячеек; II) точки интегрирования расположены в центре тяжести контрольного объема. Обращает на себя внимание тот факт, что равномерная сетка, т.е. сетка с равными между собой контрольными объемами, обладает положительными свойствами обоих способов, не вбирая их недостатков. Способ I обеспечивает точный расчет значения потока зависимой переменной через грани благодаря тому, что наклон кусочно-линейного профиля переменной равен наклону любого параболического профиля, рассчитанного посередине между узловыми точками [41]. В этом случае при использовании кусочно-линейного профиля зависимой переменной можно добиться той же точности, что и при использовании более корректного параболического профиля. При способе I значение зависимой переменной (массовая концентрация химической компоненты, температура, кинетическая энергия турбулентности) в узловой точке нельзя считать характерным для всего контрольного объема при расчете коэффициента диффузии, потока зависимой переменной, мощности источника энергии и т.д. Способ II лишен этих недостатков, т.к. сутью самого метода является то, что узел ячейки находится в центре тяжести контрольного объема. Основным достоинством способа II является то, что он обеспечивает адаптацию сетки в подобластях сосредоточения особенностей решения.

Рассмотрим реализацию второго способа построения сетки подробнее. Обычно сетка применяется трехмерная, но для простоты будем иллюстрировать этот процесс применительно к двумерной постановке.

На рисунке 2.1 показана типичная двумерная сетка. Все решения переменных и свойств жидкости хранятся в узлах (вершинах сетки). Контрольный объем (закрашенная область) строится вокруг каждого узла сетки (определяется линиями, соединяющими центры граней элементов, окружающих узел).

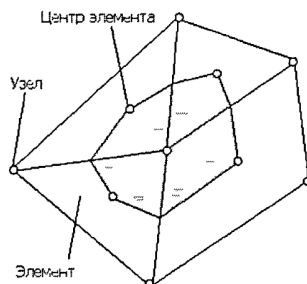


Рисунок 2.1 — Конечный (контрольный) объем.

Чтобы проиллюстрировать методологию конечных объемов, рассмотрим уравнения сохранения массы, импульса и пассивного скаляра:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (U_j) = 0$$

$$\frac{\rho \partial}{\partial t} (U_i) + \frac{\rho \partial}{\partial x_j} (U_j U_i) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right)$$

$$\frac{\rho \partial}{\partial t} (\phi) + \frac{\rho \partial}{\partial x_j} (U_j \phi) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_{eff} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \right) + S_\phi$$

Эти уравнения интегрируются для каждого контрольного объема, с использованием теоремы дивергенции Гаусса. Если контрольный объем не деформируется со временем, то производные по времени могут быть вынесены за пределы интегралов объема и интегральные уравнения принимают вид:

$$\int_S U_i d\eta_j = 0$$

$$\frac{\rho d}{dt} \int_V U_i dV + \rho \int_S U_j U_i dn_j = - \int_S P dn_j + \int_S \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V S_{U_i} dV$$

$$\frac{\rho d}{dt} \int_V \phi dV + \int_S U_j \phi dn_j = \int_S \Gamma_{eff} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_V S_\phi dV$$

где  $V$  и  $s$  - объем и поверхность интеграции, соответственно, а  $dn_j$ -дифференциальные декартовы компоненты векторов внешней нормали к поверхности.

Следующий шаг в численном алгоритме - дискретизация объемных и поверхностных интегралов. Для иллюстрации этого шага рассмотрим один элемент (рисунок 2.2).

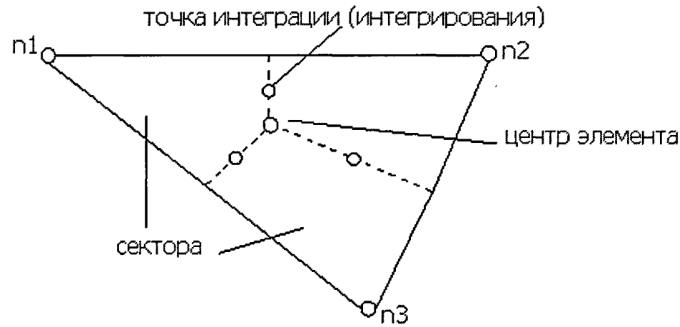


Рисунок 2.2 — Элемент сетки.

Объемные интегралы дискретизируют для каждого сектора элемента и суммируют для контрольного объема, к которому принадлежит сектор. Поверхностные интегралы дискретизируют для точек интеграции (интегрирования) ( $ipn$ ), расположенных в центре каждого сегмента поверхности элемента и затем распространяют на соседние контрольные объемы. Поскольку поверхностные интегралы равны и противоположны по знаку для контрольных

объемов, прилегающих к интеграционным точкам, поверхностные интегралы гарантированно будут локально консервативны.

После дискретизации объемных и поверхностных интегралов, интегральные уравнения принимают вид:

$$\begin{aligned} \sum_{ip} \dot{m}_{ip} &= 0 \\ \rho V \left( \frac{U_i - U_i^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} (U_i)_{ip} &= \sum_{ip} (P \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} \left( \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S_{U_i}} V \\ \rho V \left( \frac{\phi - \phi^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} \phi_{ip} &= \sum_{ip} \left( \Gamma_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S_{\phi}} V \end{aligned}$$

где  $\dot{m}_{ip} = (\rho U_j \Delta n_j)_{ip}$ ,  $V$  – контрольный объем,  $\Delta t$  – шаг по времени,  $\Delta n_j$  – дискретный внешний вектор поверхности, индекс  $ip$  – интеграционная точка, а индекс  $^0$  относится к предыдущему временному уровню.

Результаты расчетов параметров вычисляются не в узлах а в точках интеграции. В данной работе будут использованы стандартные конечно-элементные функции формы (если не указано иное) для экстраполяции в узлы. Конечно-элементные функции формы описывают изменение переменной внутри элемента следующим образом:

$$\phi = \sum_{i=1}^{Nnode} N_i \phi_i$$

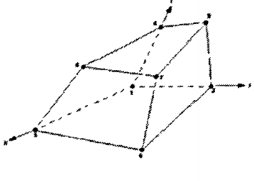
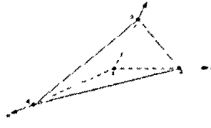
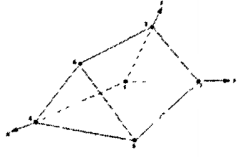
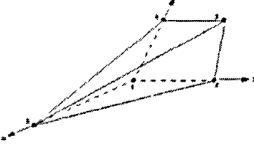
где  $N_i$  – функции формы узла  $i$  и  $\phi$  значение в узле  $i$ . Суммирование ведется по всем узлам элемента. Основные свойства функции формы включают в себя:

$$\sum_{i=1}^{Nnode} N_i = 1$$

$$N_i = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

Трилинейные функции формы для стандартных элементных сеток, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Трилинейные функции формы для стандартных элементных сеток.

Форма объема	Нумерация узлов	Трилинейная форма функции узлов
Шестигранный элемент (гексаэдр)		$N_1(s, t, u) = (1-s)(1-t)(1-u)$ $N_2(s, t, u) = s(1-t)(1-u)$ $N_3(s, t, u) = st(1-u)$ $N_4(s, t, u) = (1-s)t(1-u)$ $N_5(s, t, u) = (1-s)(1-t)u$ $N_6(s, t, u) = s(1-t)u$ $N_7(s, t, u) = stu$ $N_8(s, t, u) = (1-s)tu$
Тетраэдр		$N_1(s, t, u) = 1 - s - t - u$ $N_2(s, t, u) = s$ $N_3(s, t, u) = t$ $N_4(s, t, u) = u$
Клин		$N_1(s, t, u) = (1-s-t)(1-u)$ $N_2(s, t, u) = s(1-u)$ $N_3(s, t, u) = t(1-u)$ $N_4(s, t, u) = (1-s-t)u$ $N_5(s, t, u) = su$ $N_6(s, t, u) = tu$
Пирамида		$N_1(s, t, u) = (1-s)(1-t)(1-u)$ $N_2(s, t, u) = s(1-t)(1-u)$ $N_3(s, t, u) = st(1-u)$ $N_4(s, t, u) = (1-s)t(1-u)$ $N_5(s, t, u) = u$

Для оценки величин градиентов конечных объемов в узлах, если это необходимо, будем использовать теорему дивергенции Гаусса:

$$\nabla \phi = \frac{1}{V} \sum_{ip} (\phi \Delta \bar{n})_{ip}$$

где  $\Delta \bar{n}$  внешний вектор поверхности к  $ip$ .

Эта формула требует, чтобы  $\phi$  оценивалось по точкам интеграции с использованием конечно-элементных функций формы.

Уравнение адвекции связывает переменную в точках интеграции с ее значением в узлах. Схема может быть в общем виде представлена следующим образом:

$$\phi_{ip} = \phi_{up} + \beta \nabla \phi \Delta \vec{r}$$

где  $\phi_{up}$  – значение на «наветренном» узле, и  $\vec{r}$  – вектор, выходящий из «наветренного» узла  $ip$ . Для определения  $\beta$  и  $\nabla \phi$  используют различные схемы.

Следуя стандартному конечно-элементному подходу, функции формы используются для оценки пространственных производных для всех диффузионных слагаемых. Например, производная по направлению  $x$  для точки  $ip$ :

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{ip} = \sum_n \left. \frac{\partial N_n}{\partial x} \right|_{ip} \phi_n$$

Производные функций формы могут быть выражены через матрицу преобразования Якоби:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \\ \frac{\partial N}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \\ \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial u} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial s} \\ \frac{\partial N}{\partial t} \\ \frac{\partial N}{\partial u} \end{bmatrix}$$

Интегрирование по поверхности градиента давления в уравнении импульса предполагает оценку выражения:

$$(P \Delta n_{ip})_{ip}$$

Значение  $P_{ip}$  оценивается с помощью функции формы:

$$P_{ip} = \sum_n N_n(s_{ip}, t_{ip}, u_{ip}) P_n$$

Дискретный поток массы через поверхность конечного объема, определяется по формуле:

$$\dot{m}_{ip} = (\rho U_j \Delta n_j)_{ip}$$

Систему линейных уравнений, которая возникает при использовании МКО, можно записать в виде:

$$\sum_{nb_i} a_i^{nb} \phi_i^{nb} = b_i$$

где  $\phi$  это решение,  $i$  это идентификационный номер контрольного объема или узла,  $nb$  означает «соседний».

Узел может иметь любое число таких соседей, так что этот метод в равной степени применим как к структурированной, так и к неструктурированной сетке. Набор узлов для всех контрольных объемов формирует полную систему линейных уравнений. Для скалярных уравнений (в частности, энергии ТКЕ),  $a_i^{nb}$ ,  $\phi_i^{nb}$  и  $b_i$  числа, для связанных групп (давление-скорость) эти параметры – матрицы (4×4) и вектора (4×1), которые определяются следующим образом:

$$a_i^{nb} = \begin{bmatrix} a_{uu} & a_{uv} & a_{uw} & a_{up} \\ a_{vu} & a_{vv} & a_{vw} & a_{vp} \\ a_{wu} & a_{wv} & a_{ww} & a_{wp} \\ a_{pu} & a_{pv} & a_{pw} & a_{pp} \end{bmatrix}_i^{nb}; \quad \phi_i^{nb} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \end{bmatrix}_i^{nb}; \quad b_i^{nb} = \begin{bmatrix} b_u \\ b_v \\ b_w \\ b_p \end{bmatrix}_i^{nb}$$

Будем использовать связанный (coupled) метод решения системы гидродинамических уравнений (U, V, W, P), который применяет полностью неявную дискретизацию уравнений в любой момент времени.

Линеаризованная система дискретных уравнений, описанных выше, может быть записана в общем виде следующим образом:

$$[A][\phi] = [b]$$

Это уравнение будет решаться итерационно, начиная с приближенного решения  $\phi^n$ , которое может быть улучшено путем коррекции на слагаемое  $\phi'$ , то есть:

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \phi', \text{ где } \phi' - \text{ решение уравнения:}$$

$A\phi' = r^n$ , где  $r^n$  - невязка, полученная из  $r^n = b - A\phi^n$

Решение проводится вплоть до обеспечения заданной точности.

Поскольку производительность итеративных решателей (таких как ILU), как правило, быстро уменьшается при увеличении количества элементов сетки, применен алгебраический многосеточный метод (Algebraic Multigrid). При котором формируется система дискретных уравнений для грубой сетки путем суммирования уравнений с мелкой сеткой. Это приводит к виртуальному укрупнению сетки в ходе итераций, а затем снова происходит уточнение сетки для получения точного решения. Эта технология значительно повышает скорость сходимости. Алгебраический многосеточный метод имеет преимущество перед другими многосеточными методами, так как многосеточная дискретизация нелинейных уравнений выполняется только один раз для лучшей сетки. На рисунке 2.3 показан процесс формирования грубых сеток.

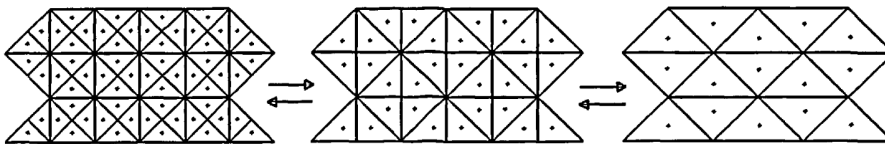


Рисунок 2.3 — Процесс формирования грубых сеток в алгебраическом многосеточном методе

Именно МКО позволяет, с одной стороны, решать параболические, гиперболические и эллиптические задачи, а с другой – использовать адаптивные сетки. Из всех описанных методов вычислительной математики только МКО сочетает в себе такие свойства, это и является основной причиной выбора этого метода для решения задачи аэродинамики пешеходных зон.

## 2.5 Численное решение стационарных и нестационарных задач

Течение в задачах аэродинамики можно рассматривать как стационарное и как нестационарное. Стационарными задачами, по определению, являются те, чьи характеристики не изменяются со временем и были достигнуты после относительно длительного промежутка времени. Поэтому они не требуют



никакой информации о реальном времени для их описания. Многие потоки можно считать устойчивым после первоначального развития нестационарных потоков.

При моделировании таких задач рассматривается установившийся поток, результатами расчета являются средние значения скоростей и давлений, осредненные кинетическая энергия турбулентных пульсаций и энергия рассеяния (диссипации).

Нестационарные задачи используют информацию о реальном времени. Нестационарное течение может быть вызвано изменением первоначально граничных условий потока, и оно может быть по своей сути связано с характеристиками потока.

Иногда при моделировании стационарного режима решение плохо сходится, вне зависимости от того, какие меры принимаются в отношении качества сетки и шага времени. Это может быть признаком нестационарности процесса.

В общем случае при решении задач пешеходной комфортности при нестационарной постановке задается поле скоростей, переменное во времени, с заданным спектром пульсаций (Давенпорта, Каймала и др.), отвечающим заданной высоте и ветровому району.

На рисунке 2.4 представлен общий процесс решения задач в стационарной и нестационарной постановках.

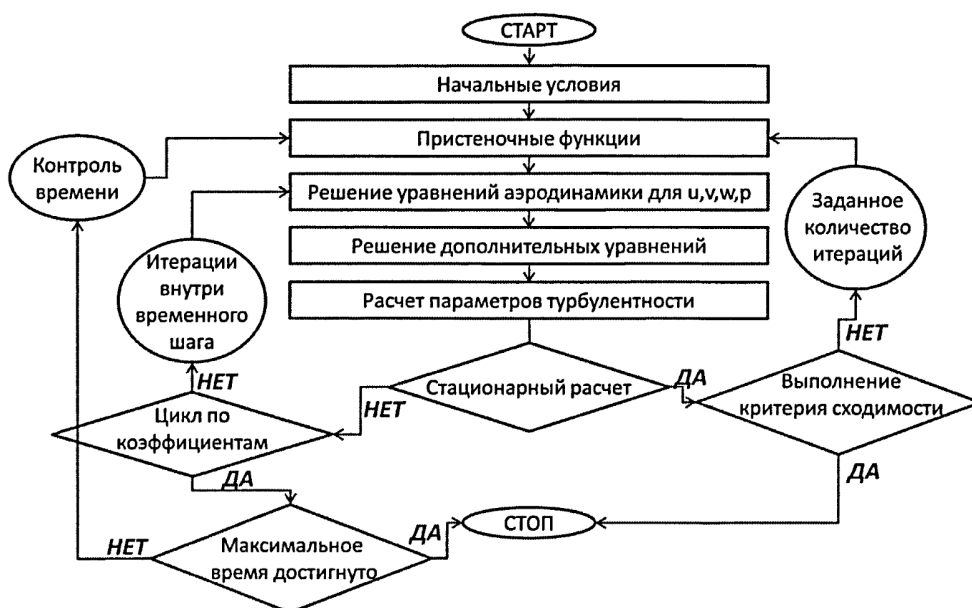


Рисунок 2.4 — Процесс решения задач в стационарной и нестационарной постановках.

## 2.6. Разработка методики моделирования зеленых насаждений

Если установлено, что на некоторых участках приземные ветры сильны и вызывают дискомфорт для пешеходов, то необходимо принимать меры для улучшения ветрового режима территории. Местные улучшения приземных ветров территории могут быть достигнуты с помощью декоративных кустарников и деревьев. Их моделирование, как в аэродинамических трубах, так и численно, является сложной задачей. Это связано, в первую очередь, со сложностью их формы. В аэродинамических трубах в качестве моделей деревьев обычно используются игрушечные деревья [87], или создается упрощенная модель дерева.

При численном моделировании воздушных потоков вблизи деревьев возможно применять следующие подходы:

- Создание модели дерева похожей на реальное (с ветками и листьями);
- Область дерева моделируется пористой упрощенно (в виде конуса или параллелепипеда).

В обоих подходах существуют свои сложности – при первом подходе они связаны с тем, что моделирование дерева сложная задача, требующая высоких вычислительных затрат и ее решение занимает большее количество машинного времени, чем при моделировании дерева с помощью второго подхода.

Рассмотрим постановку задачи, при использовании второго подхода.

При решении системы уравнений (2.1) в уравнении сохранения движения появляется член, отвечающий за потери импульса через пористую область [47]:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + S_{M,x} \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + S_{M,y} \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + S_{M,z} \end{cases}$$

Потери импульса через изотропную пористую область могут быть сформулированы на основе проницаемости и коэффициентов потери следующим образом:

$$\begin{cases} S_{M,x} = -K_{loss} \frac{\rho}{2} u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ S_{M,y} = -K_{loss} \frac{\rho}{2} v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ S_{M,z} = -K_{loss} \frac{\rho}{2} w \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $K_{loss}$  - коэффициент потер, связанный с инерционными потерями ( $m^{-1}$ ).

Инерционные потери могут быть связаны с:

- искривленностью поровых каналов,
- сужением-расширением пор,
- образованием вихрей.

При моделировании дерева упрощенно, в виде пористой поверхности, сложность заключается в подборе коэффициента потери, который будет адекватно отражать проницаемость реального дерева.

## 2.7. Выводы по главе

1. Расчеты ветровых потоков в пешеходных зонах сводятся к решению трехмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики с учетом вязкости в постановке Навье-Стокса для несжимаемой жидкости (для упрощения моделирования массовые силы не учитываются).

2. Сформулированы основные требования к расчетным моделям задач пешеходной комфортности, а именно к размерам расчетной области, к выбору начальных и граничных условий.

3. Обоснован выбор метода конечных (контрольных) объемов в качестве метода дискретизации задач пешеходной комфортности и описана его математическая формулировка.

4. Течение в задачах аэродинамики можно рассматривать как в стационарных, так и в нестационарных постановках. В общем случае при решении задач пешеходной комфортности при нестационарной постановке задается поле скоростей, переменное во времени, с заданным спектром пульсаций (Давенпорта, Каймала и др.), отвечающим заданной высоте и ветровому району. Разработан алгоритм решения стационарных и нестационарных задач.

5. Разработана и описана методика моделирования зеленых насаждений, основанная на их представлении в виде «эквивалентных» пористых подобластей.

### **Глава 3. Программная реализация методики численного моделирования скоростей ветра в пешеходных зонах жилой застройки**

#### **3.1. Возможности и структура программного комплекса ANSYS CFD.**

В качестве базового программного комплекса, отвечающего требованиям, описанным в главе 2, был выбран программный комплекс ANSYS CFD, который позволяет учесть все компоненты разработанной методики, в том числе дискретизацию задач МКО, использованием большого количества моделей турбулентности RANS, возможностью моделировать как стационарные, так и не стационарные задачи.

ANSYS - многоцелевой конечно-элементный пакет для проведения анализа в следующих отраслях: авиация и космос, биомедицинские устройства, вентиляция и кондиционирование, нефтехимическая и газовая отрасль, общее машиностроение, охрана окружающей среды, строительство, судостроение и гидротехнические сооружения, транспорт, турбомашиностроение, энергетика.

Все программные продукты ANSYS сертифицированы согласно международным стандартам, а также ГОСАТОМНАДЗОР России: регистрационный номер ПС в ЦОЭП при РНЦ КИ №490 от 10.09.2002; регистрационный номер паспорта аттестации ПС №145 от 31.10.2002.

Это универсальный, конечно элементный пакет, предназначенный для решения в единой среде на одной и той же конечно-элементной модели задач по прочности, теплу, электромагнетизму, гидрогазодинамике, многодисциплинарного связанного анализа и оптимизации на основе всех выше приведенных типов анализа [46].

#### **3.2. Этапы расчета задач пешеходной комфортности в ANSYS CFD**

Представим основные этапы расчетов скоростей ветра в пешеходных зонах жилой застройки непосредственно в ANSYS CFD:

1 этап: создание геометрии, которая может быть, как непосредственно создана в ANSYS, так и конвертирована из других программ, таких как, AutoCad, SolidWorks, 3dsMax, SCAD, LIRA и т.д.

2 этап: создание 3D-геометрии воздушного пространства, построение сетки. В результате этого этапа создается файл \*.cdb, который содержит геометрию и сетку и непосредственно загружается в ANSYS CFX Pre.

3 этап: загрузка созданной сетки в ANSYS CFX Pre. Задание граничных начальных условий, параметров расчета. В результате работы ANSYS CFX Pre создаются файлы \*.cfx, \*.def, \*.ccl. Файл \*.cfx содержит данные о физике процесса. Файл \*.def содержит информацию о постановке задачи, включая геометрию, сетку поверхности, граничные условия, параметры среды, параметры решателя и начальные переменные. Он и импортируется ANSYS CFX Solver для запуска процесса решения задачи. Файл \*.ccl – это текстовый файл, описывающий постановку задачи решателю ANSYS CFX Solver.

4 этап: расчет ANSYS CFX Solver. Метод конечных объемов с локальной многоуровневой адаптацией. Итерационное решение. Основные неизвестные: давление  $P$ , скорости  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ , средняя кинетическая энергия турбулентности  $TKE$ , средняя частота пульсаций. В результате работы ANSYS CFX Solver создаются файлы \*.res, \*.out. Файл \*.res содержит полную информацию о результатах задачи, включая пространственную сетку и значения каждой переменной в каждом узле сетки. Этот файл используется как входной файл в ANSYS CFX Post. Выходной файл \*.out содержит информацию о настройках модели ANSYS CFX, состоянии решения в процессе работы Solver и статистику решения задачи.

5 этап: обработка и анализ результатов ANSYS CFX Post. Графики, рисунки, таблицы, анимация. В результате работы ANSYS CFX Post создаются файлы \*.cst. В качестве результата работы, ANSYS CFX Post генерирует различные графические файлы, содержащие графическое представление решения поставленной задачи [47].

Для реализации 2 этапа расчета была разработана подпрограмма (макрос на языке программирования APDL), которая создает сетку специально ориентированную на задачи определения скоростей ветра в пешеходных зонах.

### **3.3. Описание разработанной подпрограммы для дискретизации задач пешеходной комфортности**

Разработанная подпрограмма (макрос) позволяет автоматизировать процесс создания сетки и варьировать ее параметры.

APDL это параметрический язык программирования ANSYS (ANSYS Parametric Design Language), язык сценариев, который может быть использован для автоматизации стандартных задач или даже создавать модель выраженную через параметры (переменные). APDL также охватывает широкий диапазон других возможностей, типа повторения команды, макроса, выполнения перехода "если-тогда-иначе", создания циклов, а также скалярных, векторных и матричных операций.

В то время как APDL - основа для сложных задач, типа оптимизационного расчета и адаптивного построения сетки, он также предлагает много удобств, которые могут быть использованы в обычных расчетах.

Макрос - это последовательность команд ANSYS, сохраненных в файле [46].

Цикл работы разработанного макроса можно условно разделить на несколько шагов.

Первым шагом данного макроса создается геометрическая область модели или конвертируется из других программ в ANSYS.

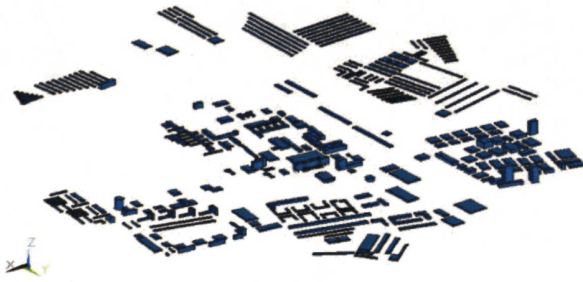


Рисунок 3.1 — Пример модели застройки, созданной в ANSYS.

Вторым шагом строится цилиндрическая область с заданным диаметром и высотой выше здания на заданную величину. Для этого задаются высота  $z_p$ , которая выше уровня представления результатов для пешеходной комфортности, например  $z_p=2.0$  м (при плоскости рассмотрения результатов для пешеходной комфортности на высоте  $z=1.5$ м), и высота  $z_2$ , равная высоте самого высокого здания. После чего строится цилиндрическая область с центром в центре модели застройки и высотой равной от  $z_p$  до  $z=z_2+dz$ , где  $dz$  задается пользователем, радиус цилиндрической области составляет  $r_c$ , равный сумме максимальному отклонению от центра модели по  $x$  или  $y$  и  $dr$ , который задается пользователем.

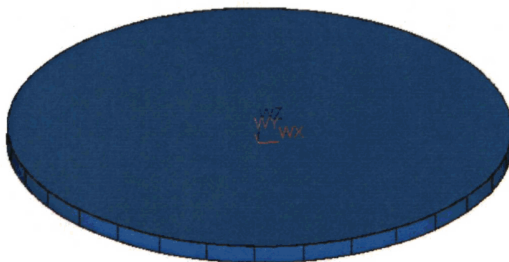


Рисунок 3.2 — Пример цилиндрической области

Третьим шагом строится тетраэдральная сетка, с возможностью задания различного количества элементов и их размеров на высоте 2.0 м, на высоте здания, на поверхностях здания, на боковой границе области и на нижней границе области.



Четвертым шагом полученная область вытягивается до высоты конечной сетки. Сетка ниже значения 2.0 м разбивается на призматические элементы (количество которых задается пользователем), с помощью "выдавki" до нулевой высоты.



Рисунок 3.3 — Построение сетки (шаг три и четыре).

Пятым шагом полученная сетка разбивается на области, которым задаются названия областей для передачи в ANSYS CFX Pre, а именно: для плоскости на высоте  $z=0$ , задается название "земля", для самой верхней плоскости задается название "небо", также на этом этапе создаются границы на цилиндрической области с шагом угла = 22.5 градуса, если будет использоваться роза ветров для 16 направлений ветра и с шагом 15 градусов, если будет использоваться роза ветров для 24 направлений ветра. После чего полученная сетка сохраняется в формате \*.cdb, для последующей работы с ней в ANSYS CFX.

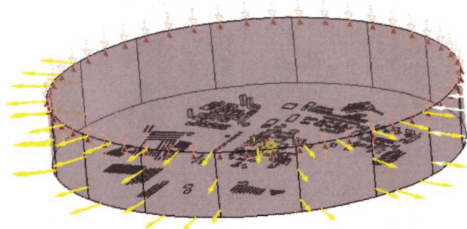


Рисунок 3.4 — Модель, импортированная в ANSYS CFX Pre

Таким образом, при загрузке построенной сетки в ANSYS CFX Pre мы имеем сетку, адаптированную для расчета скоростей ветра в пешеходных зонах, которая сгущена в приземной области.

### 3.4. Описание программы критериальной оценки аэродинамической комфортности в пешеходных зонах

В связи с тем, что в ПК ANSYS CFD, равно, как и в других пакетах гидрогазодинамики нет встроенного расчета на оценку пешеходной комфортности, было принято решение о создании программы, позволяющей обрабатывать результаты для пешеходных зон и осуществлять критериальную оценку уровней пешеходной комфортности.

Для реализации программы была выбрана платформа Microsoft .NetFramework и язык программирования C#. При принятии решения об использовании данного языка программирования были учтены следующие факторы:

- 1) Возможность быстро разработать удобный пользовательский интерфейс;
- 2) C# является одним из универсальных языков программирования прикладного уровня;
- 3) Наличие огромного количества справочных ресурсов в открытом доступе.

Изначально был создан прототип программы, реализующей два метода оценки пешеходной комфортности по критерию МДС и шкале Бофорта. После тестирования прототипа программы и анализа полученных данных было принято решение реализовывать другие методы оценки пешеходной комфортности.

Программа реализует расчет критериев пешеходной комфортности по пяти нормам и *оценку распределения относительных скоростей*.

В главе 1 был проведен анализ существующих отечественных и зарубежных нормативных документов, определяющих критерии пешеходной комфортности.

В качестве выводов по проведенному анализу можно отметить следующее:

1. В настоящее время почти во всех странах существуют нормы по определению ветровых воздействий на здания и сооружения, в то время как норм, имеющих юридическую силу, для оценки ветровых воздействий в пешеходных зонах городской застройки существует единицы, а именно МДС (в России) и NEN 8100:2006в Нидерландах.

2. Тем не менее, при оценке ветровых воздействий в пешеходных зонах в странах Европы чаще всего используют шкалу Бофорта, реже NEN 8100:2006 и нормы Вайса и Пенвардена, в Америке используют критерии, разработанные Лоусоном, в Японии - нормы Вайса и Пенвардена.

3. При сравнении вышеперечисленных норм, использующихся в разных странах можно отметить следующее: шкала Бофорта – не является критериальной оценкой пешеходной комфортности, это лишь система баллов для ветровых воздействий; нормы Вайса и Пенвардена не учитывают повторяемость какого-либо значения ветра, а лишь разделяют ветровое воздействие на три уровня; российский МДС в своей основе имеет три критические скорости ветра и критическое количество повторений каждой скорости; в нормах NEN 8100:2006 за основу берется критическая скорость ветра 5 м/с, и, в зависимости от количества повторений скорости, большей, чем это критическое значение, рассматриваются 5 уровней комфортности; в RWDI за основу берется шкала Бофорта, критерии же в свою очередь рассматриваются для различных видов человеческой деятельности и имеют два значения: неприемлемое и допустимое. Таким образом, можно сделать вывод, что все рассмотренные нормы совершенно разные.

В виду того, что в настоящее время существуют различные критерии пешеходной комфортности в различных странах, было принято решение в качестве одного из методов оценки пешеходной комфортности использовать поле распределения относительных скоростей. Суть которого заключается в следующем: полученные скорости ветра для каждого направления ветра в каждой точке  $V_i$  делятся на значение скорости в контрольной точке (значение скорости на высоте 10м, замеряемое на метеостанции) и получаются коэффициенты  $k_{\theta i}$ .

Далее для каждого направления ветра по розе ветров каждый получившийся коэффициент  $k_{\theta i}$  умножается на соответствующее значение доли повторяемости данного направления ветра  $f_{\theta}$ .

Окончательные относительных скоростей ветра  $k_i$  для всех направлений получаем путем суммирования коэффициентов  $k_{\theta i}$  для всех направлений ветра.

При определении критериев пешеходной комфортности важно учитывать пульсационную составляющую ветра, для этого вместо скорости  $V_i$  в описанной методике рассматривается  $V_i^e = V_i + k * \sqrt{TKE}$ , основанная на формуле (1.19) где  $k$  – преобразованная постоянная величина, характеризующая степень значимости повторяемости пульсаций,  $TKE = \frac{1}{2}(\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'})$  – среднее значение турбулентной кинетической энергии.

Данная методика определения относительных скоростей ветра позволяет получить полную картину усиления ветра в каждой рассматриваемой точке.

Для разработки алгоритмов расчёта критериев пешеходной комфортности и структурированного хранения данных реализованы следующие классы:

Класс GlobalWind содержит в себе служебные переменные, такие как список входных файлов с наблюдениями, розу ветров Москвы в процентах и часах и т.д.

Класс GlobalMsg содержит все сообщения, которые выводит программа в процессе работы, включая различные сообщения об ошибках.

Класс cWind реализован для структурированного хранения входной информации (положение в пространстве, значение скорости ветра).

Класс cWindResult реализован для структурированного хранения выходной информации (положение в пространстве, значение скорости ветра).

В классе cWindList реализуется хранение массива входных данных, загрузка файлов с наблюдениями, содержатся алгоритмы расчета критериев пешеходной комфортности, формируется массив выходных данных.

Опишем принцип работы данной программы.

В качестве входных данных необходимо задать розу ветров. Для этого создана библиотека, содержащая розы ветров для различных городов (библиотека постоянно расширяется). Если необходимой розы ветров нет в библиотеке, то ее можно задать в программе в табличном виде.

Далее задаются: коэффициент  $k$  (по умолчанию  $k = 1,5$ );  $V_n$  - значение скорости на высоте 10м, замеряемое на метеостанции; директорию с входными файлами наблюдений.

Входные файлы могут быть как результатами численного расчета, так и результатами моделирования в аэродинамической трубе или натурных замеров.

После сопоставления файлов с данными и направлениями ветра запускается расчет, в ходе которого происходят следующие действия:

- 1) Подготовка структур входных и выходных данных
- 2) Загрузка данных
- 3) Подготовка данных к расчету (определяем  $V$  по формуле  $V = V + k * \sqrt{TKE}$ , параметр  $k=0$  в том случае, если выбрана опция «Не учитывать TKE»).
- 4) Выполнение расчёта алгоритмов для определения основных критериев пешеходной комфортности:
  - Алгоритм №1 реализует оценку распределения относительных скоростей.
  - Алгоритм №2 реализует критерии МДС.
  - Алгоритм №3 осуществляет определение скорости ветра по шкале Бофорта для каждой точки измерения.
  - Алгоритм №4 реализует нормам Нидерландов NEN 8100.
  - Алгоритм №5 реализует нормы Лоусона, использующиеся в RWDI.
  - Алгоритм №6 реализует нормы Вайса.
- 5) Сохранение выходных данных в файл.

В программе имеется возможность анализировать информацию для любого количества направлений ветра.

В результате работы программы формируется файл, который можно загрузить в ANSYS CFX Post для анализа результатов и их графического представления.

Разработанная программа позволяет оценивать пешеходную комфортность как без учета пульсационной составляющей ветра и с учетом пульсационной составляющей [14].

Программа зарегистрирована в Роспатенте (Свидетельство о государственной регистрации №2013611022 от 27.03.2013г.).

### **3.5. Выводы по главе**

1. В качестве базового программного комплекса, отвечающего требованиям, разработанной методики выбран программный комплекс ANSYS CFD.

2. Для автоматизации процесса построения расчетных сеток разработана подпрограмма (макрос), реализующая подготовку оптимальной расчетной сетки для задач пешеходной комфортности. Подпрограмма написана на языке APDL ANSYS.

3. Разработана программа, реализующая оценку пешеходной комфортности по различным нормам и методикам. Программа зарегистрирована в Роспатенте (Свидетельство № 2013613169 от 27 марта 2013г.).

## Глава 4. Верификация методики

### 4.1. Критерии выбора тестовых задач

Разработанную методику численного моделирования скоростей ветра в пешеходных зонах жилой застройки можно верифицировать на основе сравнения с результатами натурных испытаний и испытаний в аэродинамических трубах для моделей, включающих изолированные здания, зеленые насаждения и группы зданий.

Критериями выбора задач для верификации численного моделирования скоростей ветра в пешеходных зонах жилой застройки были следующие:

- эксперименты должны проводиться группами исследователей под руководством ведущих специалистов в области аэрогидродинамики на сертифицированном оборудовании и в специализированных лабораториях;
- данные о постановке эксперимента и его результатах должны быть полными и достаточными для численного моделирования задачи.

В данной работе в качестве верификационных задач рассматриваются следующие:

- моделирование эксперимента по обдувке комплекса из двух зданий в аэродинамической трубе;
- моделирование обтекания параллелепипеда с соотношением сторон 4:4:1;
- моделирование живой изгороди;
- моделирование эксперимента по обдувке модели одиноко стоящего дерева.

В AIJ, основного разработчика нормативных документов в Японии, подготовлен документ “Guide book for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings”, включающий ряд тестов для верификации результатов численного моделирования ветровых потоков в пешеходных зонах [95]. Кроме того, тесты AIJ наиболее удобны для реализации и загрузки (в частности, оцифрованы модели, координаты датчиков и результаты тестов) и, на наш взгляд, более практичны и “убедительны”. Особо следует отметить, что

приведены результаты не только замеров в аэродинамических трубах, но и натуральных измерений на местности.

#### 4.2. Численное моделирование эксперимента по обдувке комплекса из двух зданий в аэродинамической трубе

Эксперимент проводился в НИИ Механики МГУ. Институт механики располагает уникальным аэродинамическим комплексом, состоящим из до-, сверх- и гиперзвуковых установок с широким диапазоном изменения параметров, оснащенных современными средствами измерения, сбора и обработки информации.

В эксплуатации находятся 12 аэродинамических установок. Эксперимент проводился на установке А-6.

Аэродинамическая труба А-6 является основной установкой лаборатории общей аэродинамики для проведения экспериментальных исследований при малых дозвуковых скоростях.

Труба А-6 – замкнутая, одноканальная с открытой рабочей частью эллиптического сечения. Размеры рабочей части трубы: длина – 4 м, большая ось эллипса – 4 м, малая ось – 2,35 м, площадь поперечного сечения рабочей части –  $7,32 \text{ м}^2$ , степень поджатия сопла  $n=5,09$ .

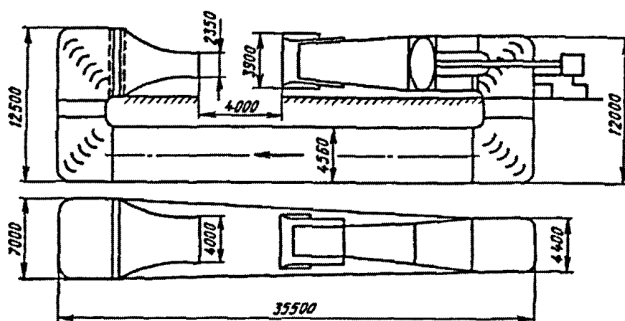


Рисунок 4.1 — Схема трубы А6.

Приводом трубы служит шестилопастный вентилятор диаметром 4,4 м, вращаемый двигателем постоянного тока мощностью 2 МВт. Изменение скорости



потока в рабочей части достигается изменением числа оборотов двигателя в пределах от 0 до 750 оборотов в минуту, осуществляемым по схеме Леонардо.

Максимальная скорость потока в рабочей части трубы при наличии модели равна 50 м/с.

Качество потока в рабочей части характеризуется следующими величинами:

- неравномерность величины скорости не более  $\pm 0,5\%$ ;
- скос потока в вертикальной и горизонтальной плоскостях не более  $\pm 0,25^\circ$ ;
- градиент статического давления вдоль оси трубы –  $0,002 \text{ м}^{-1}$ ;
- критическое число Рейнольдса для шара диаметром 150 мм – 375000;
- продольная составляющая интенсивности турбулентности в пустой рабочей части не более 0,2%.

Для увеличения интенсивности турбулентности в рабочей части до  $\varepsilon \leq 10\%$  установка снабжена набором съемных сеток-кассет, устанавливаемых на срезе сопла. Числа Рейнольдса, подсчитанные для модели с линейными характерными размерами  $0,5 \leq l \leq 1,5 \text{ м}$ , соответствуют диапазону  $10^5 \leq Re \leq 10^7$ , что обеспечивает изучение аэродинамики транспортных средств, промышленных сооружений и летательных аппаратов, как в докритической, так и за критической зонах обтекания.

Труба оборудована шестикомпонентными аэродинамическими весами для измерения стационарных сил и моментов.

В эксперименте измерение давления на поверхностях модели проводилось с использованием датчиков давления. Важным этапом проведения эксперимента является выбор модели датчика. Основой датчика давления является тензочувствительный элемент. Это, как правило, четыре идентичных пьезорезистора, имплантированных в канавки, вытравленные на поверхности кремниевой мембраны, и соединенные по мостовой схеме. Все датчики давления можно классифицировать по типу измеряемого давления: абсолютное, дифференциальное, избыточное и вакуум. В данном эксперименте использовались дифференциальные двунаправленные (способные измерять как разряжение, так и избыточное давление с одной стороны мембраны) датчики

давления. По типу выходного сигнала датчики давления можно классифицировать на три большие группы: базовые, термокомпенсированные с заводской калибровкой смещения и диапазона и термокомпенсированные с заводской калибровкой и нормализованным выходным сигналом. Характерным недостатком датчиков с базовым типом выходного сигнала является сильная зависимость характеристики преобразования температуры и большой разброс напряжения смещения от образца к образцу. Такие датчики давления используются в приложениях, где нет необходимости в точном измерении, а требуется лишь грубая оценка. Термокомпенсированные и калиброванные датчики давления отличаются от базовых более сложной структурой чувствительного элемента. Выходной сигнал таких датчиков значительно стабильнее, а разброс начального напряжения смещения, как правило, не превышает  $\pm 1$  мВ при размахе выходного напряжения 70...100 мВ (для сравнения: разброс напряжения смещения у базовых датчиков -  $\pm 20...30$  мВ). У датчиков с температурной компенсацией с заводской калибровкой и нормализованным выходным сигналом на кристалле расположен усилитель, схема линеаризации характеристики и преобразователь, реализующий один из стандартных типов выходного сигнала.

В данном эксперименте были использованы датчики давления Freescale Semiconductor MPXV7002DP. Рабочий диапазон давления которых от  $-2,0$  до  $2,0$  кПа; напряжение питания 5В; паспортная точность 2,5% от полной шкалы; время отклика 1мс, калиброванные и компенсированные по температуре [13].

Измерение производилось с помощью аналого-цифровой преобразователь (АЦП) фирмы National instruments (NIUSB-6225; число каналов – 80; разрядность – 16 бит; полная частота опроса – 250 тыс. отсч./с).

Тарировка датчиков выполнялась с помощью калибратора давлений фирмы «ЭКО-ИНТЕХ».

Контроль скорости осуществлялся с помощью трубки Пито-Прандтля.

Экспериментальная модель представляет собой комплекс из двух зданий: одноподъездное двадцати трех этажное и многоподъездное девятиэтажное.

Одноподъездное двадцати трех этажное здание имело следующие размеры: 590 мм – высота, 218 мм – длина, 188 мм – ширина; многоподъездное девятиэтажное здание сложной формой располагалось за первым зданием на расстоянии 215 мм и имело высоту 230 мм, ширина здания – 85 мм, длина части здания, расположенной параллельно высотному - 580 мм, а части, расположенной под углом – 305 мм. На модели располагалось 24 датчика давления: 16 – на высоком, и 8 – на низком (рисунок 4.2).

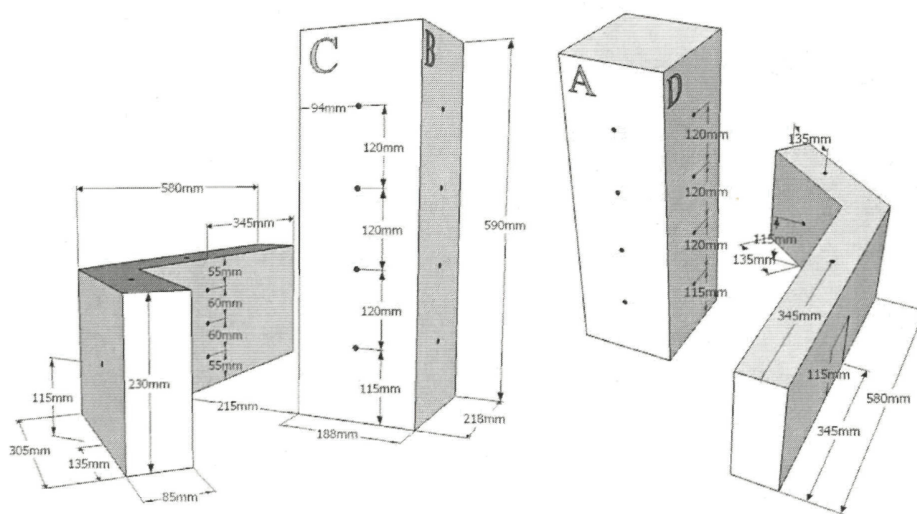


Рисунок 4.2 — Размеры и расположения датчиков на модели.

Датчики устанавливались на модель с помощью дренажа, результатом которого является вывод давления из точки на поверхности плоской пластины через дренажную трубку на измерительный прибор. Дренаж выполнялся медными трубками с внутренним диаметром 1 мм. Для прокладки трубок высверливались отверстия в точках снятия давления. Каждая такая трубка соединяется с капиллярной трубкой, которая в свою очередь соединена со своим измерительным датчиком и замаркирована. Длины капиллярных трубок составляли от 2,5 до 25 см. Датчики давления располагались внутри модели.

Перед использованием датчиков давления все они были оттарированы с помощью калибратора давлений фирмы «ЭКО-ИНТЕХ».

Скорость набегающего потока в аэродинамической трубе равна 25 м/с.

Модель зданий обдувалась под восемнадцатью разными углами (-22; -18; -12; -6; 0; 6; 12; 18; 22; 158; 162; 168; 174; 180; 186; 192; 198; 202). В каждом положении выполнялось 2500 отсчетов с частотой регистрации 1000 отсч./сек и программно вычислялась средняя величина давлений, которая записывается в файл. В каждом сечении выполнено несколько измерений.

В ходе обработки экспериментальных данных сравнивались показания датчиков при нулевых скоростях до и после эксперимента.

Контроль скорости осуществлялся с помощью трубки Пито-Прандтля.

Экспериментальные данные давления в точках были обработаны с помощью среды графического программирования National Instruments LabView [16].

Для обработки результатов была написана специальная программа.

При численном моделировании эксперимента геометрическая модель объекта была подготовлена в ANSYS, при составлении расчетной сетки применялся макрос, описанный в п. 3.3. данной работы. Этот макрос был адаптирован под данную задачу - сетка была составлена не в виде цилиндрической области, а имитировала аэродинамическую трубу. В модели примерно 1.2 миллиона узлов, 2.8 миллиона ячеек (из них 1.9 миллиона тетраэдральных, 46.5 тысяч призматических и около 600 гексаэдральных). Были заданы следующие граничные и начальные условия: на входе в модель – скорость 25 м/с; на выходе из модели – граничные условия, обеспечивающиеся постоянным статическим давлением; пол, модели зданий, стены трубы – условие «no slip».

Для углов 0, 180 и 22<sup>0</sup> численный эксперимент проводился для трех различных моделей турбулентности, а именно: k-ε, SST и k-ε RNG. Графическое представление результатов отображено на рисунках 4.3-4.11.

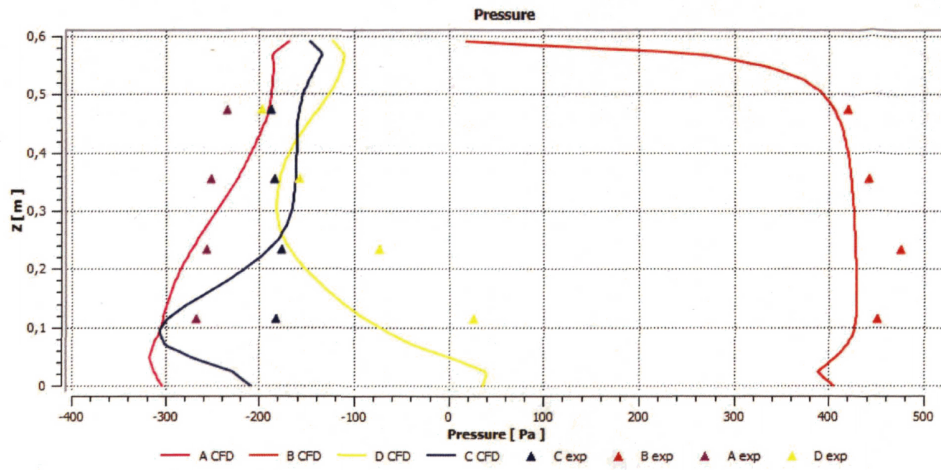


Рисунок 4.3 — Давления на линиях расположения датчиков для высотного здания при угле поворота  $0^0$  (модель k- $\epsilon$  RNG).

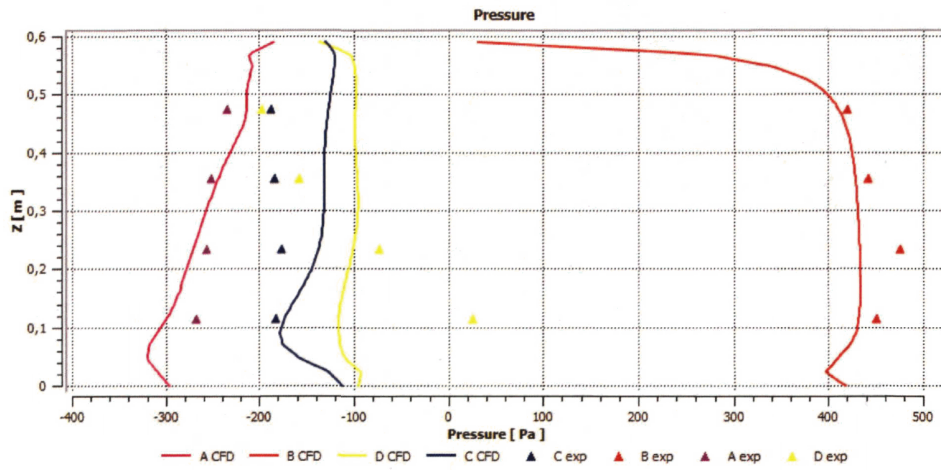


Рисунок 4.4 — Давления на линиях расположения датчиков для высотного здания при угле поворота  $0^0$  (модель k- $\epsilon$ ).

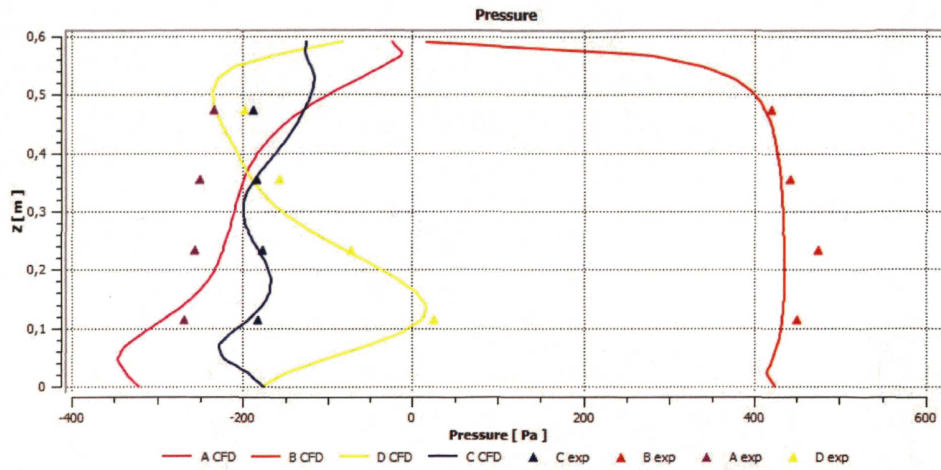


Рисунок 4.5 — Давления на линиях расположения датчиков для высотного здания при угле поворота  $0^0$  (модель SST).

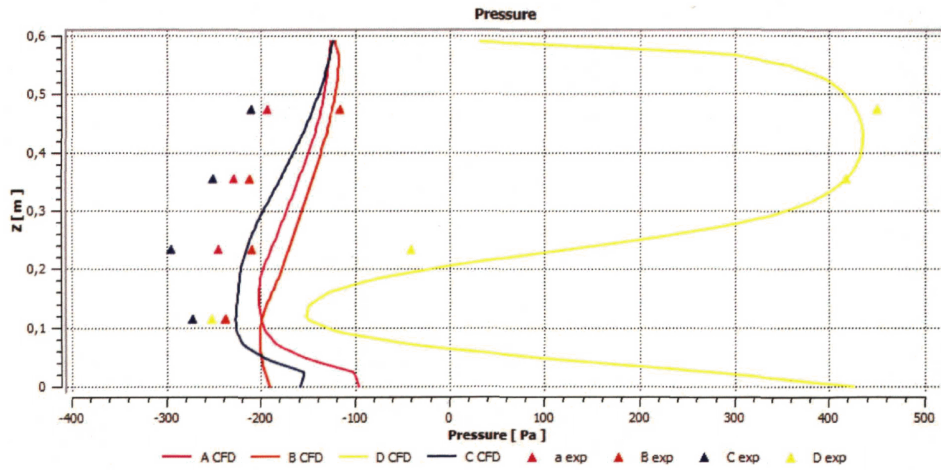


Рисунок 4.6 — Давления на линиях расположения датчиков для высотного здания при угле поворота  $180^0$  (модель k-ε RNG).

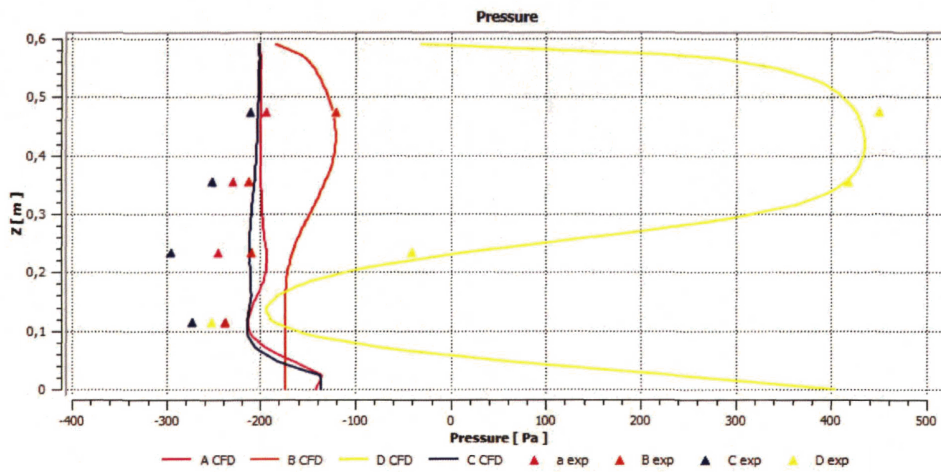


Рисунок 4.7 — Давления на линиях расположения датчиков для высотного здания при угле поворота  $180^{\circ}$  (модель k-ε).

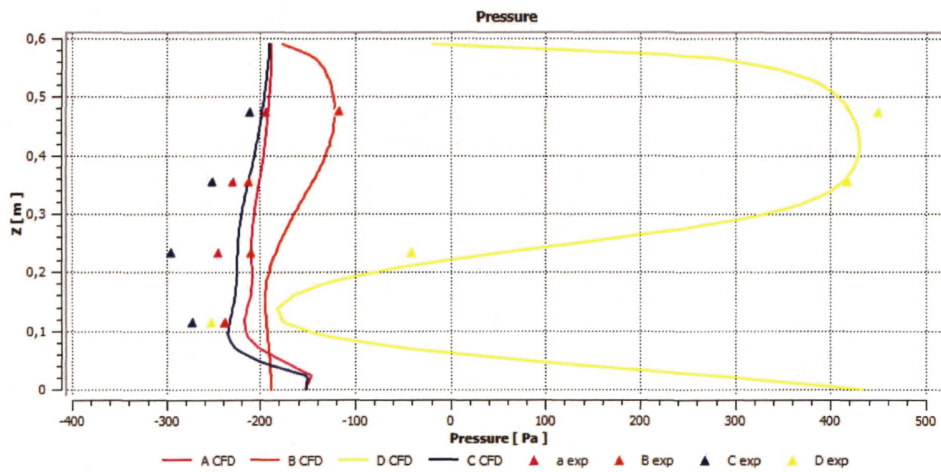


Рисунок 4.8 — Давления на линиях расположения датчиков для высотного здания при угле поворота  $180^{\circ}$  (модель SST).

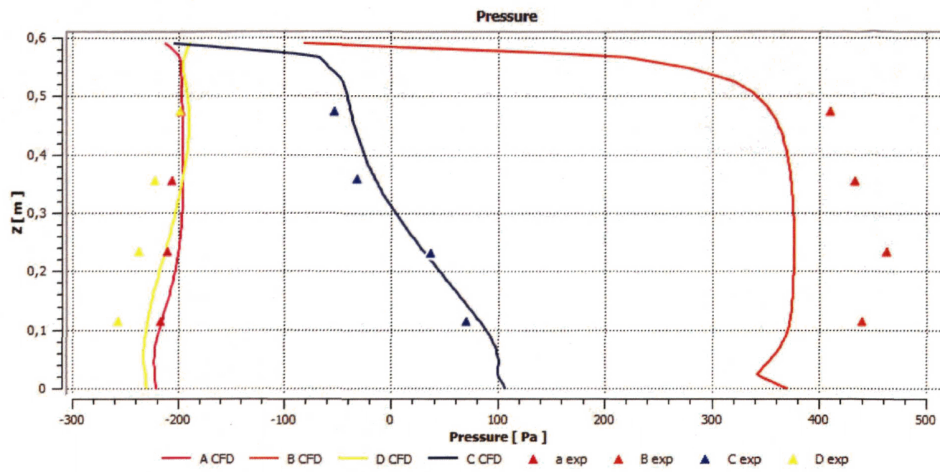


Рисунок 4.9 — Давления на линиях расположения датчиков для высотного здания при угле поворота  $22^{\circ}$  (модель k- $\epsilon$  RNG).

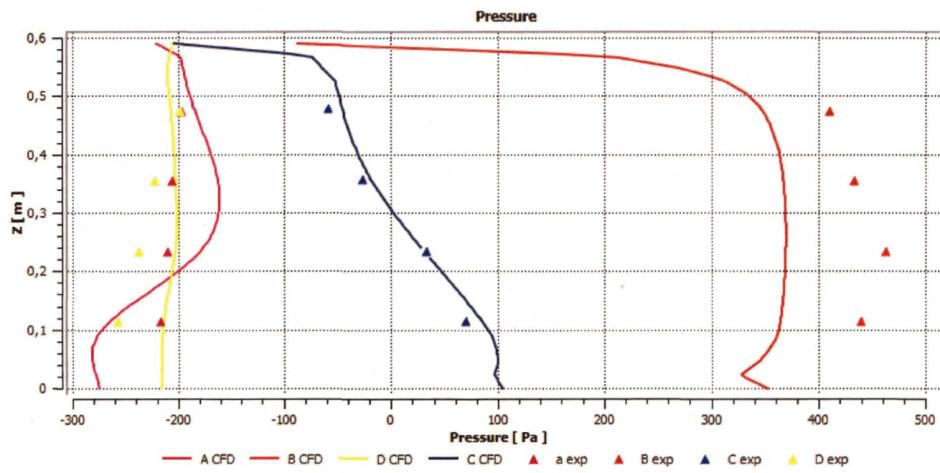


Рисунок 4.10 — Давления на линиях расположения датчиков для высотного здания при угле поворота  $22^{\circ}$  (модель k- $\epsilon$ ).



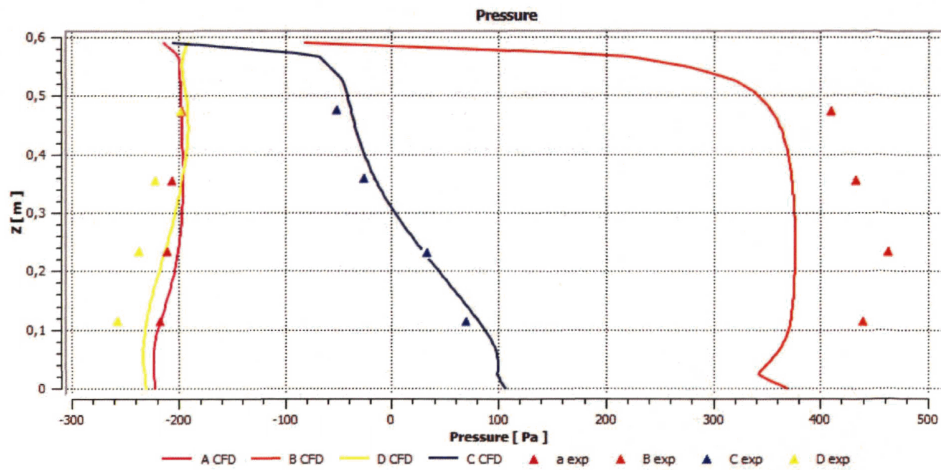


Рисунок 4.11 — Давления на линиях расположения датчиков для высотного здания при угле поворота  $22^{\circ}$  (модель SST).

Для угла  $22^{\circ}$  отклонения результатов численного моделирования от эксперимента составили для модели SST – 11%, для модели k-ε RNG – 11.5%, для модели k-ε – 14.6%. Для угла  $0^{\circ}$  отклонения результатов численного моделирования от эксперимента составили для модели SST – 12.3%, для модели k-ε RNG – 26.3%, для модели k-ε – 28.8%. Для угла  $180^{\circ}$  отклонения результатов численного моделирования от эксперимента составили для модели SST – 15.9%, для модели k-ε RNG – 19.4%, для модели k-ε – 38.9%. Среднее отклонение для всех точек измерения составило для модели SST – 13.16%, для модели k-ε RNG – 19.08%, для модели k-ε – 27.81% (таблица 4.1). Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что для данной задачи результаты лучше всего сходятся при модели турбулентности SST.

Таблица 4.1 - Относительная погрешность между результатами эксперимента и моделями турбулентности

Модель турбулентности	SST	RNG k-ε	k-ε
%	13.16	19.08	27.81

### 4.3. Обтекание параллелепипеда

Второй задачей для верификации стала задача обтекания параллелепипеда с соотношением сторон 4:4:1. В АИГ был проведен ряд тестов в аэродинамической трубе, для такого параллелепипеда, при этом рассматривалась задача определения скоростей ветра как по высоте, так и на пешеходном уровне. В диссертационной работе Дубинского С.И. рассматривалась задача обтекания параллелепипеда размерами 1:1:2 в стационарной постановке (без рассмотрения пешеходной зоны) [17]. Задача обтекания параллелепипеда решалась как в стационарной, так и в нестационарной постановке.

В эксперименте, проведенном японскими учеными, рассматриваются два сечения: центральное вертикальное сечение и горизонтальное сечение, расположенное на пешеходном уровне. Скорость измерялась с помощью анемометров (split fiber type anemometer) [93]. На рисунках 4.12-4.13 представлена модель и расположение точек замера в аэродинамической трубе.

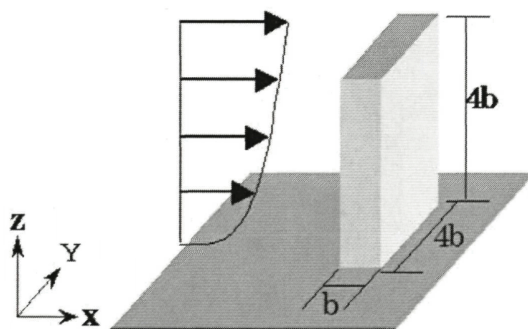


Рисунок 4.12 — Модель параллелепипеда.

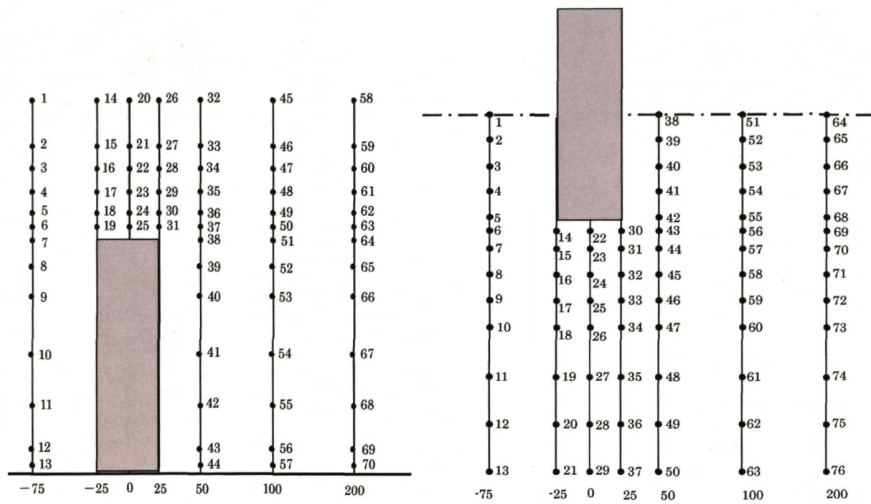


Рисунок 4.13 — Положение точек замера скоростей потока центральное вертикальное сечение и горизонтальное сечение  $z=0.0125$  м.

Геометрическая модель и расчетная сетка генерировались в препроцессоре ANSYS с использованием разработанного параметризуемого макроса, описанного в п.3.3. Область воздушного пространства, окружающего здание задавалась в форме параллелепипеда размерами 10 высот здания до его модели, 24 – за, 4 – над.

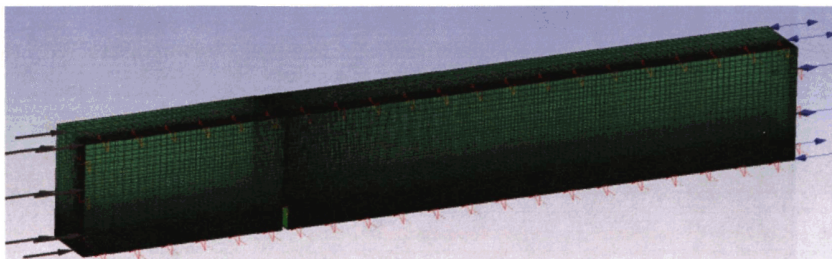


Рисунок 4.14 — Расчетная модель.

Отметим, что задача решалась с использованием симметрии, а именно модель состояла из «половины» здания, и на центральной плоскости задавалось граничное условие «симметрия».

Для области расчета задан тип среды – идеальный газ при температуре 285K и давлении 1 атм. Задача рассматривалась в изотермической постановке.

Для набегающего потока было задано граничное условие типа «вход», с параметрами набегающего потока, замеренного в эксперименте в аэродинамической трубе (таблица 4.2).

На верхней, нижней поверхности расчетной области и на поверхности сооружения заданы условия "no slip".

На "выходе" из области применялись граничные условия, обеспечивающиеся постоянным статическим давлением.

Таблица 4.2. Параметры набегающего потока в эксперименте в аэродинамической трубе.

z[mm]	U[m/s]	k (ТКЕ) [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
5	2,865	0,376
10	3,059	0,410
20	3,280	0,428
30	3,427	0,486
50	3,784	0,537
100	4,381	0,624
200	5,133	0,556
300	5,724	0,512
400	6,191	0,450
600	7,004	0,378
800	7,433	0,274
1000	7,840	0,106

Первым этапом, с целью выбора оптимальной модели турбулентности, рассматриваемая задача решалась в стационарной постановке для 5 различных моделей турбулентности SST, k-ε, RNG k-ε, k-ω, BSL (с количеством 10 элементов по высоте для пешеходной зоны). Модель составила 1 395 978 ячеек.

Сравним результаты, полученные для моделей турбулентности SST, k-ε, RNG k-ε, k-ω, BSL. Рассмотрим распределение горизонтальной составляющей скорости ветра перед зданием рисунок 4.15.

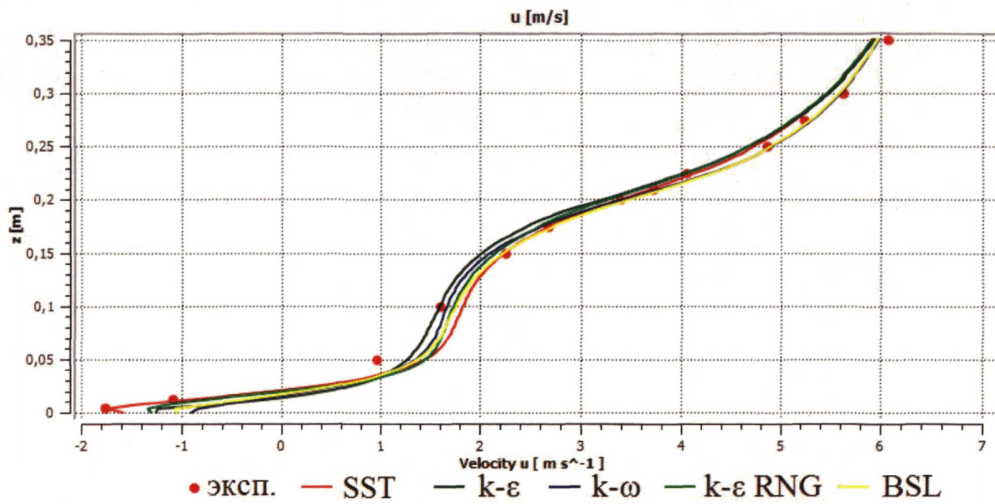


Рисунок 4.15 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте перед зданием  $x=-0.075$  м.

Результаты для всех рассмотренных моделей турбулентности близки к результатам эксперимента при  $x=-0.075$  м. Далее рассмотрим результаты распределения скорости ветра над зданием рисунки 4.16.-4.18.

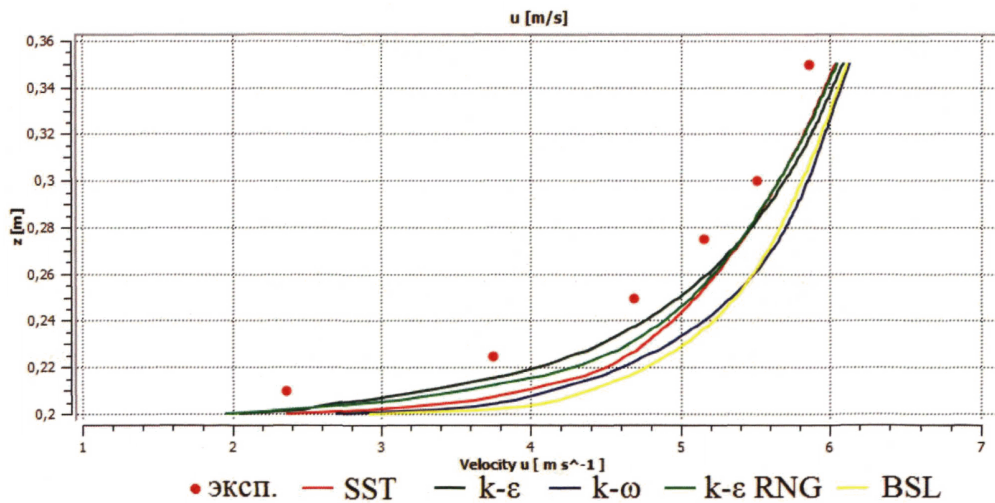


Рисунок 4.16 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте над зданием  $x=-0.025$  м.

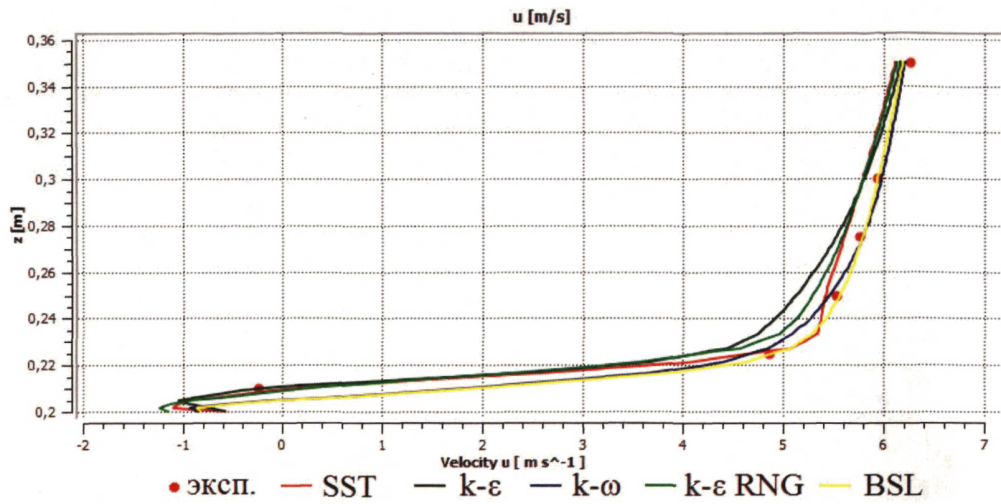


Рисунок 4.17 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте над зданием  $x=0$  м.

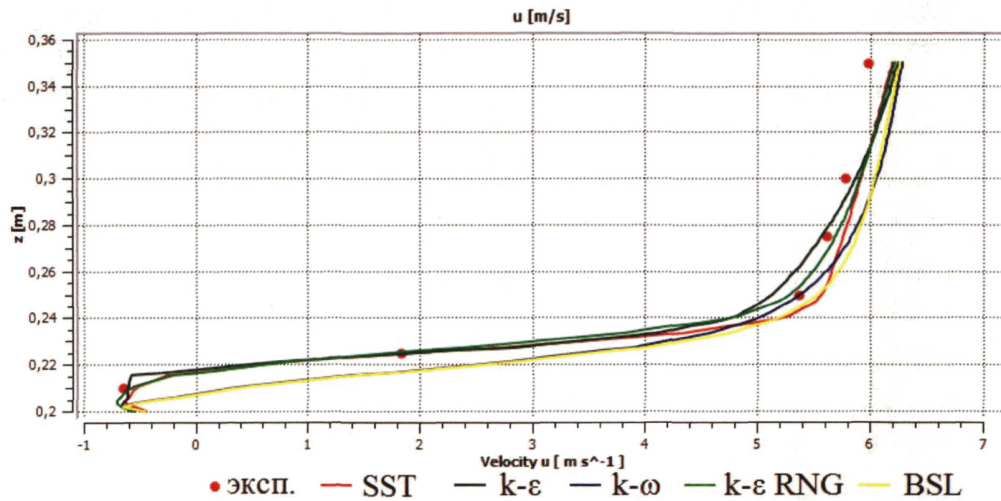


Рисунок 4.18 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте над зданием  $x=0.025$  м.

Для области над зданием результаты для всех рассмотренных моделей турбулентности близки к результатам эксперимента.

Рассмотрим область за зданием рисунки 4.19.- 4.21.

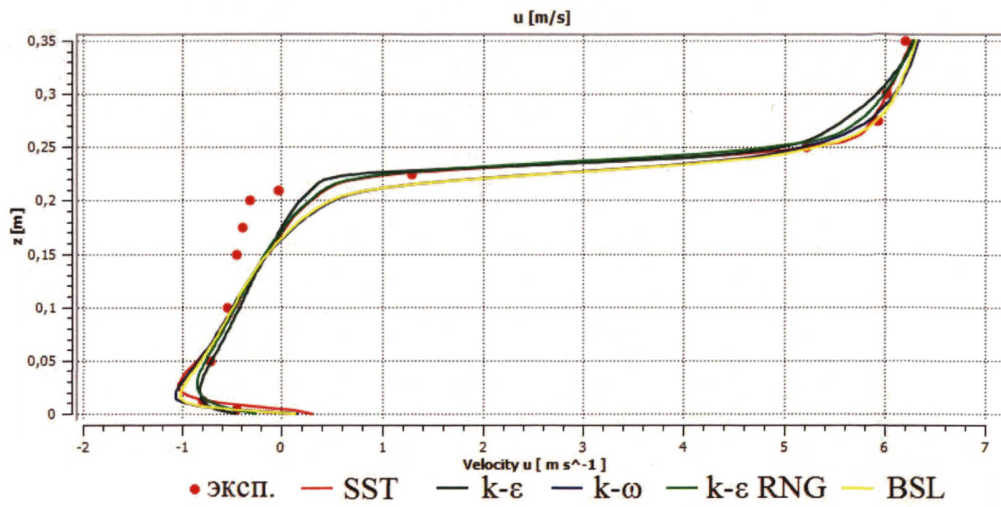


Рисунок 4.19 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте за зданием  $x=0.05$  м.

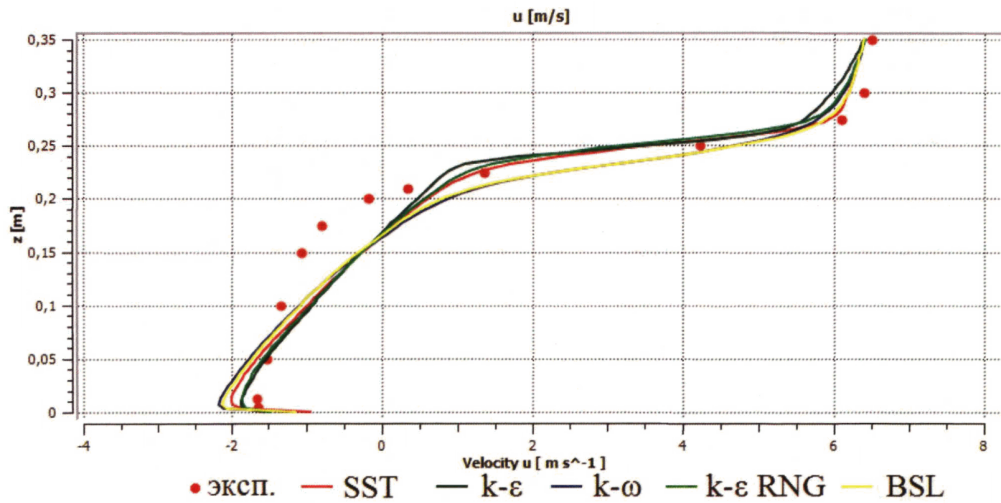


Рисунок 4.20 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте за зданием  $x=0.1$  м.

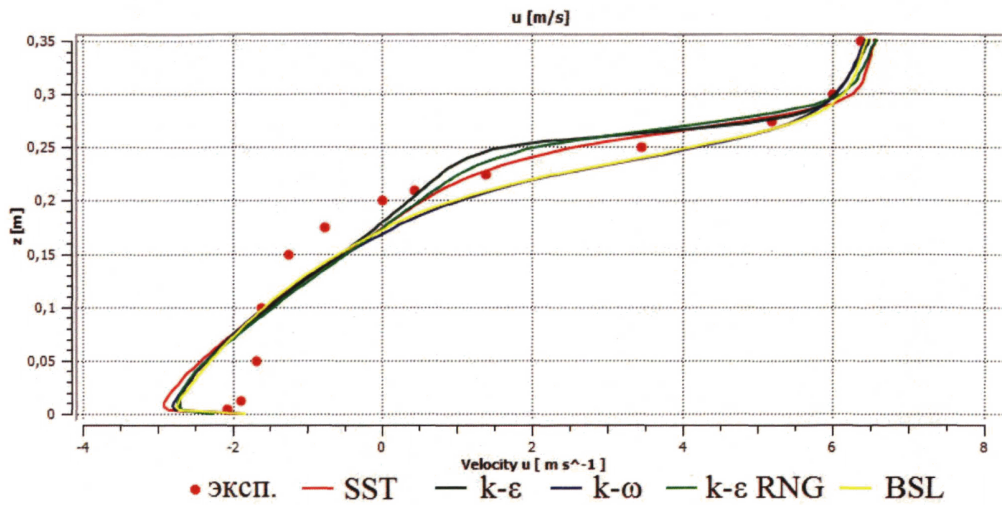


Рисунок 4.21 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте за зданием  $x=0.2$  м.

Для области за зданием результаты для всех рассмотренных моделей турбулентности близки между собой и к результатам эксперимента.

Теперь рассмотрим результаты для плоскости пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.

Перед зданием рисунок 4.22, с боку от здания рисунки 4.23-4.25, за зданием рисунки 4.26-4.28.

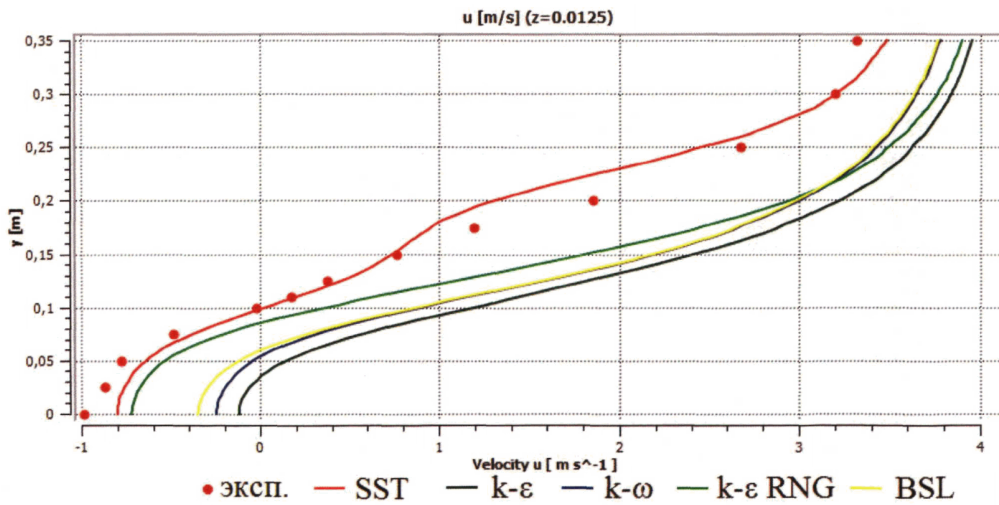


Рисунок 4.22 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра перед зданием  $x=-0.075$  м. на высоте пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.



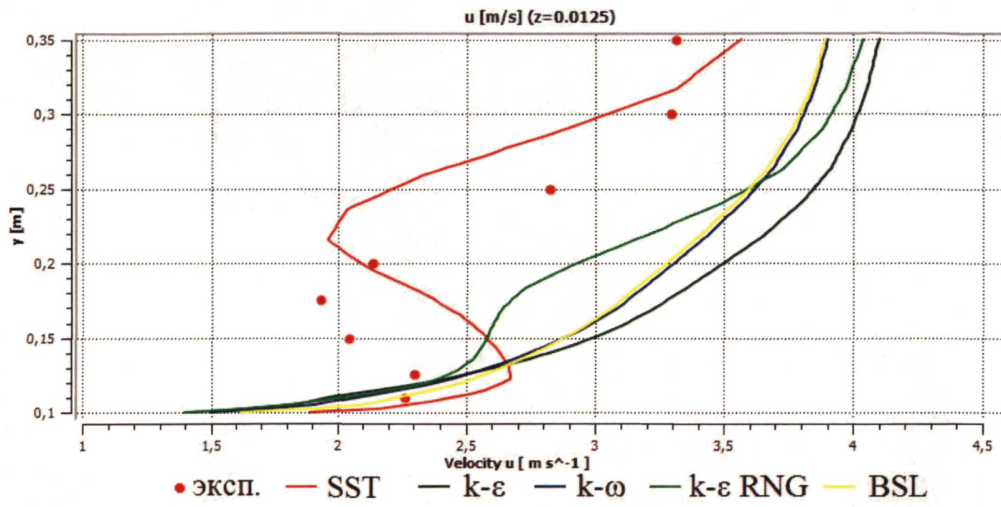


Рисунок 4.23 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра с боку от здания  $x=-0.025$  м. на высоте пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.

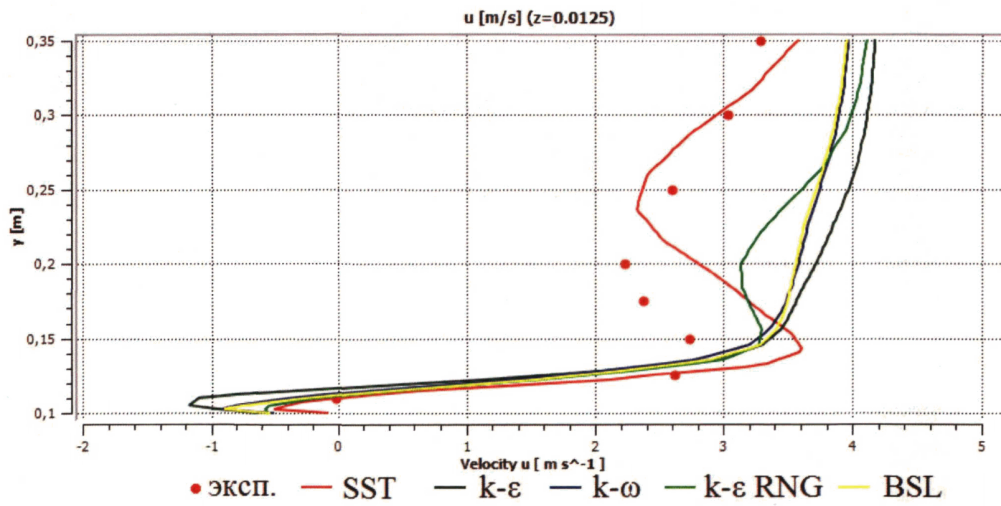


Рисунок 4.24 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра с боку от здания  $x=0$  м. на высоте пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.

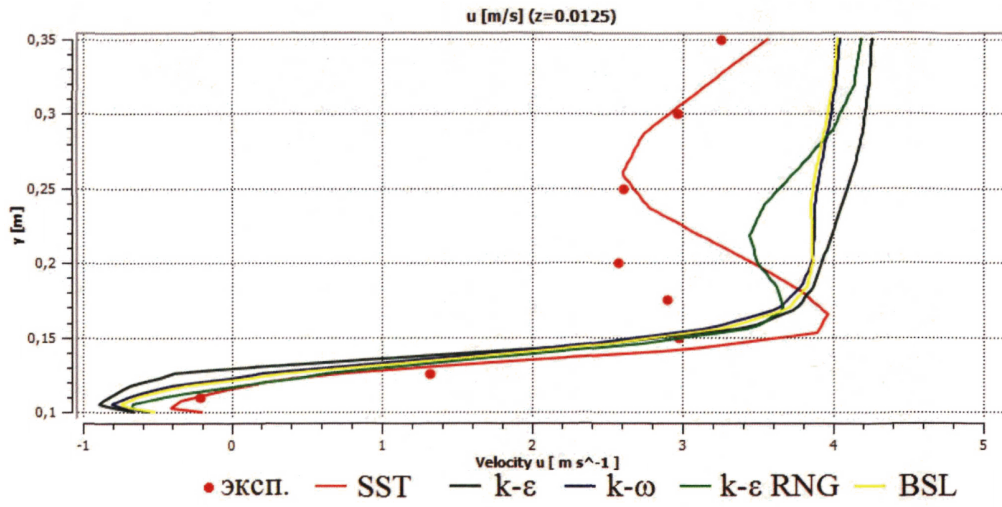


Рисунок 4.25 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра с боку от здания  $x=0.025$  м. на высоте пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.

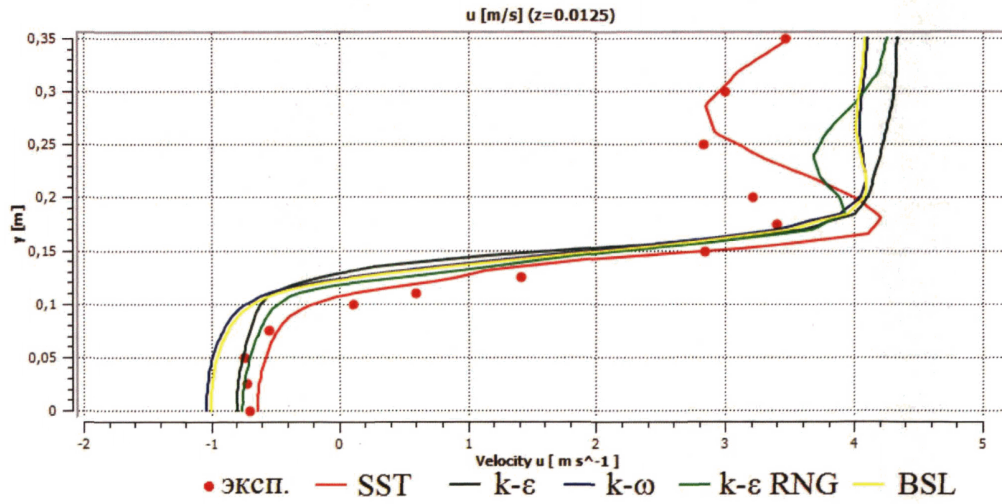


Рисунок 4.26 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра за зданием  $x=0.05$  м. на высоте пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.

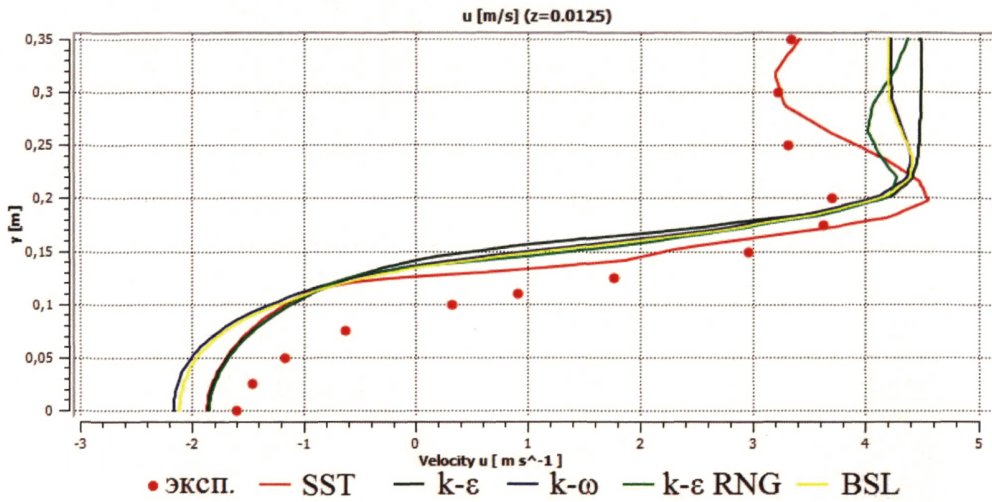


Рисунок 4.27 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра за зданием  $x=0.1$  м. на высоте пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.

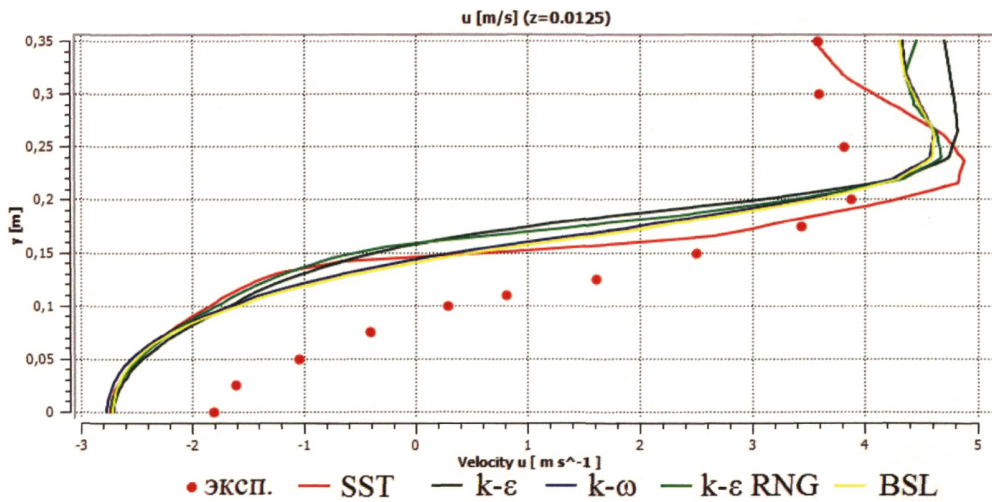


Рисунок 4.28 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра за зданием  $x=0.2$  м. на высоте пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.

Для пешеходной зоны результаты в аэродинамической трубе и при численном моделировании различаются. При этом результаты, полученные при использовании моделей турбулентности  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$ , BSL вообще не отображают картины течения. При использовании модели турбулентности SST характер течения просматривается, однако «амплитуды» графиков, полученных

во время эксперимента отличаются от полученных при численном моделировании. Это может быть связано как с недостатком информации об аэродинамической трубе, так и с тем, что измерения анемометрами для высоты 5 мм, не могут давать точные результаты. Лучшим способом измерения для такой задачи было бы использования доплеровской системы, которая не вносит изменения в поток.

Результаты приведенной относительной погрешности для данного эксперимента сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3. - Приведенная относительная погрешность между результатами эксперимента и численным моделированием с использованием различных моделей турбулентности.

BSL%	RNG k-ε%	k-ω%	k-ε%	SST%	
5,99	3,79	5,99	3,76	3,63	По высоте
15,52	14,09	16,24	18,69	8,81	На уровне пешехода

Следующим этапом были рассмотрены сетки с различным количеством делений до высоты пешехода, а именно 2, 5, 10 и 20 элементов для данной задачи при использовании модели турбулентности SST.

Ниже представлены результаты для центрального сечения рисунки 4.29-4.35.

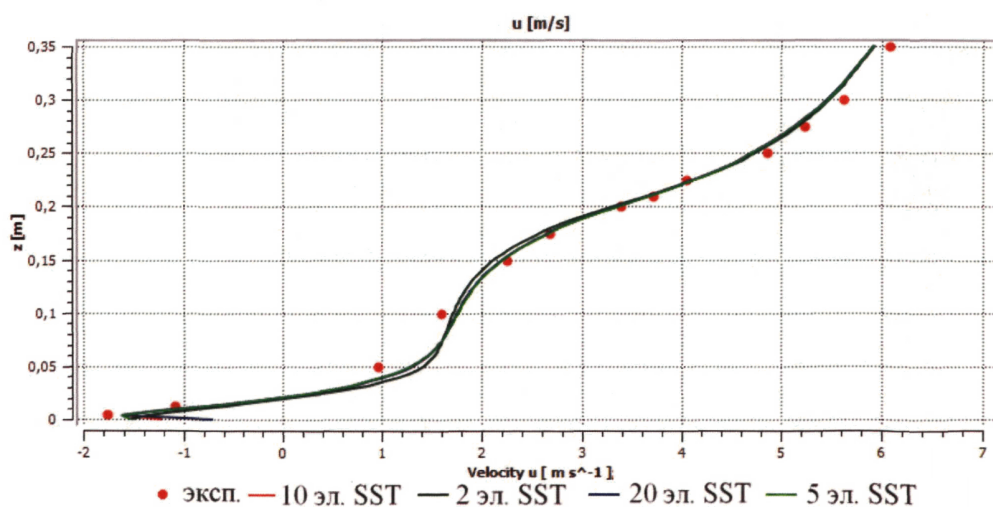


Рисунок 4.29 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте при  $x=-0.075$  м.

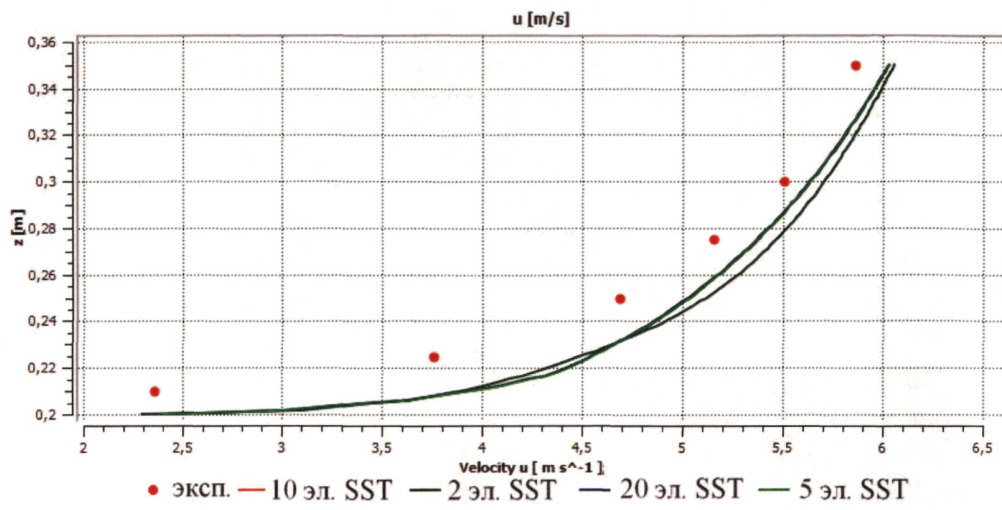


Рисунок 4.30 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте при  $x = -0.025$  м.

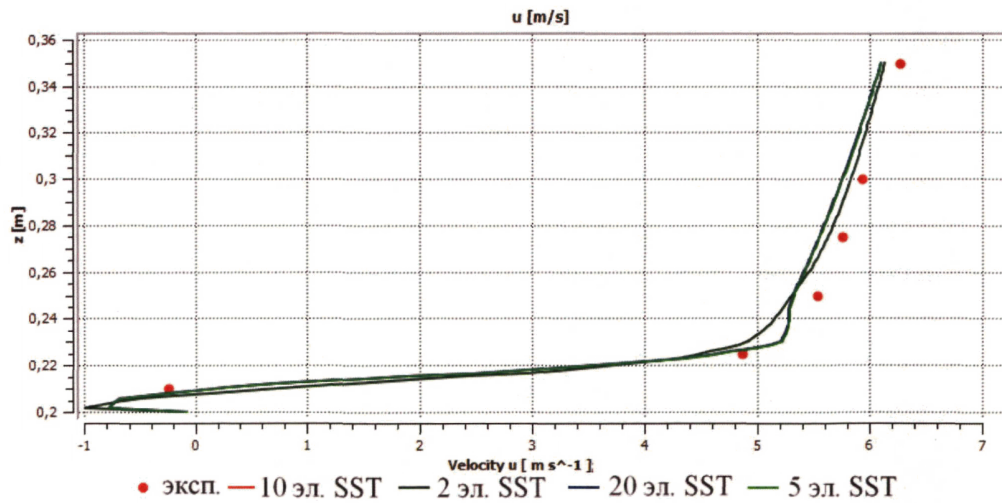


Рисунок 4.31 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте при  $x = 0$  м.

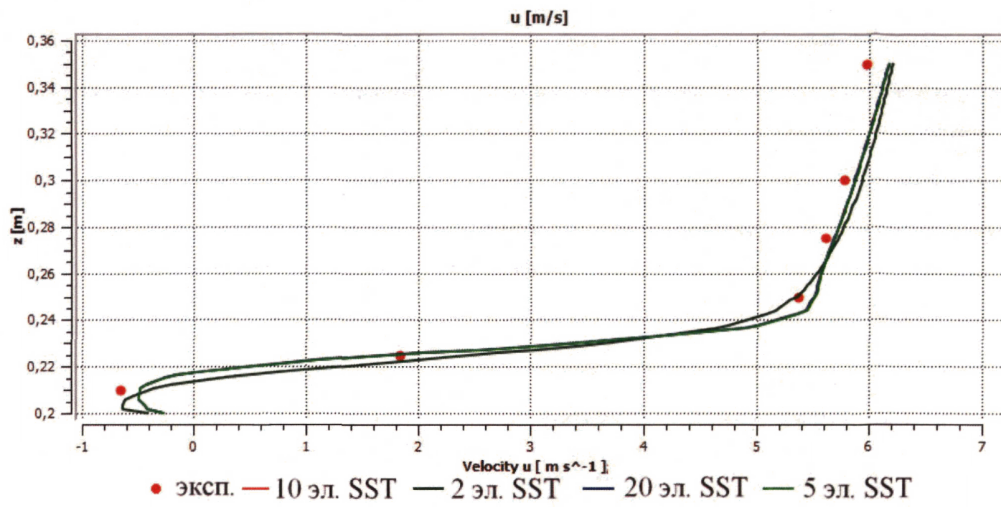


Рисунок 4.32 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте при  $x=0.025$  м.

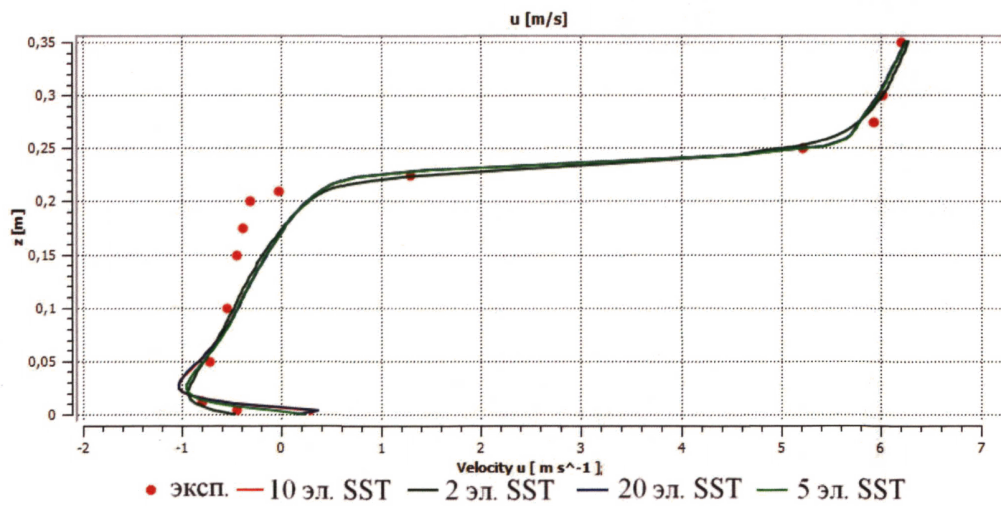


Рисунок 4.33 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте при  $x=0.05$  м.

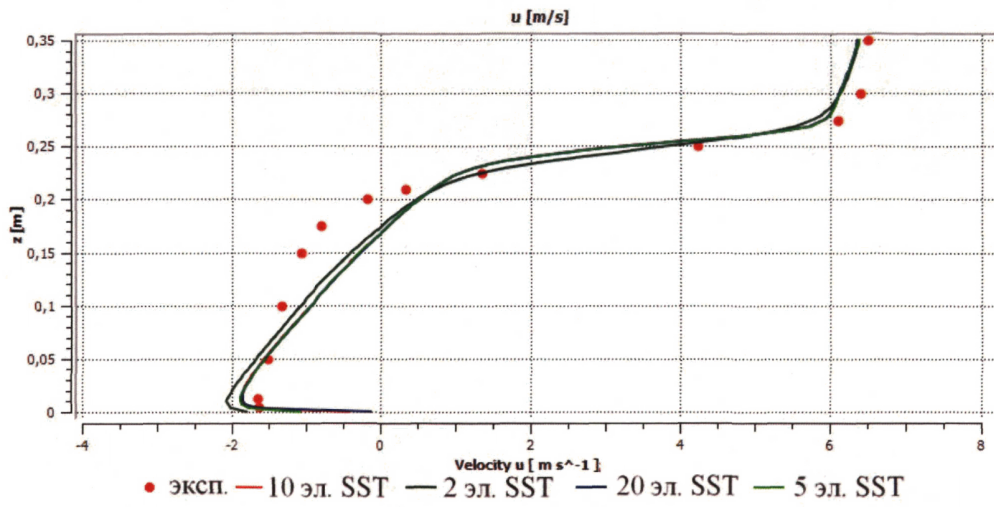


Рисунок 4.34 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте при  $x=0.1$  м.

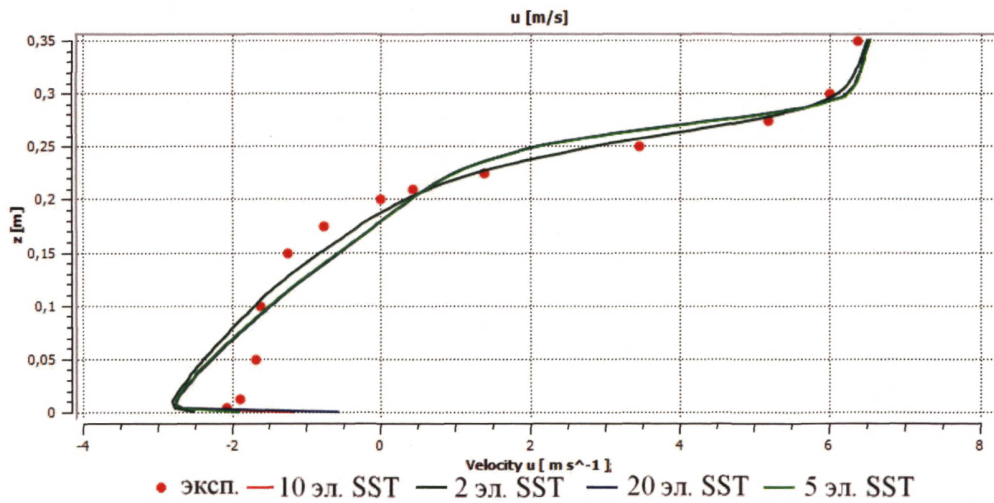


Рисунок 4.35 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра по высоте при  $x=0.2$  м.

По полученным результатам можно говорить о том, что количество делений сетки до пешеходного уровня существенного влияния на картину распределения скоростей ветра по высоте не оказывает.

Далее (рисунки 4.36-4.42) рассматриваются результаты численного моделирования при использовании модели турбулентности SST с сетками с разным количеством элементов по высоте до пешеходного уровня для сечения на пешеходном уровне.

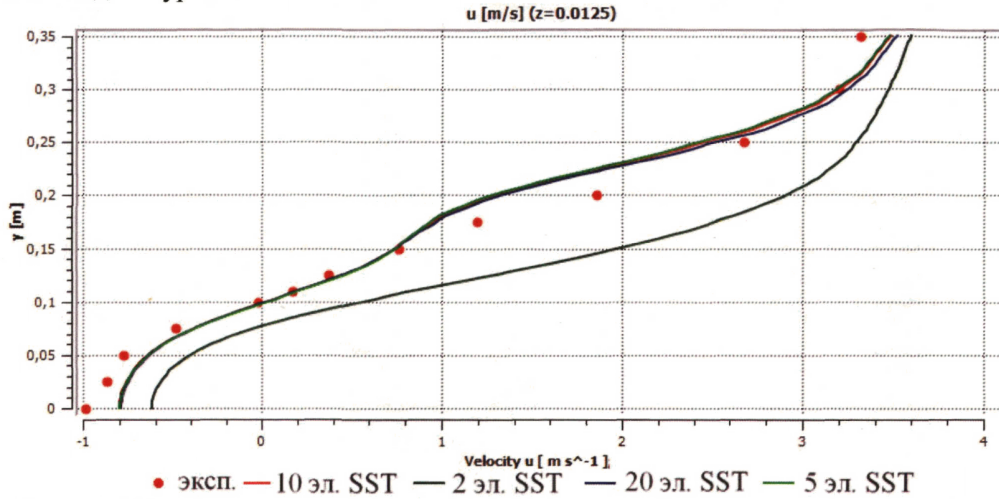


Рисунок 4.36 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра перед зданием  $x=-0.075$  м. на высоте пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.

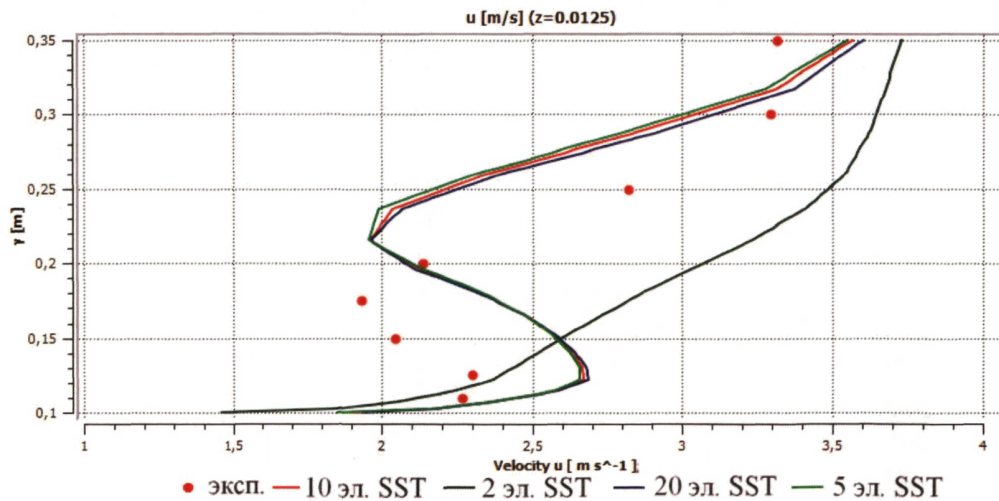


Рисунок 4.37 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра над зданием  $x=-0.025$  м. на высоте пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.



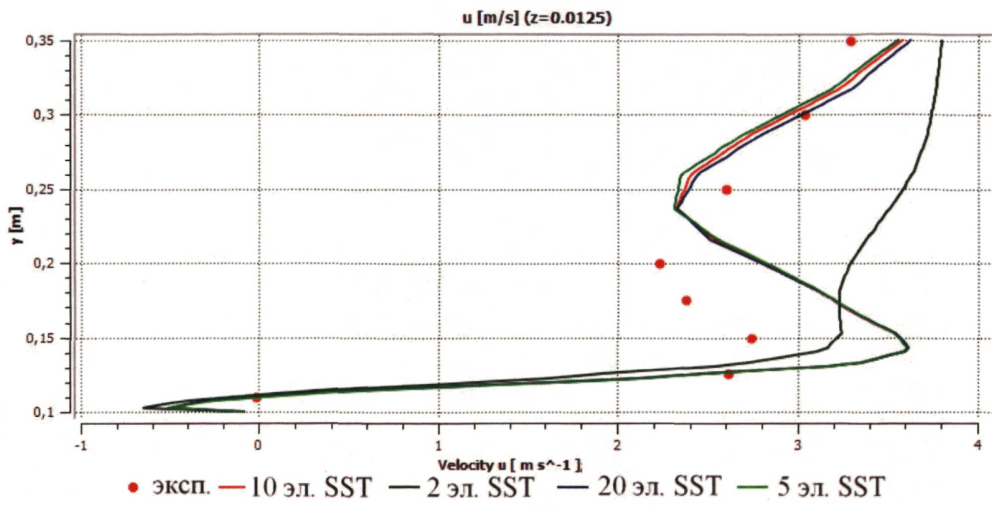


Рисунок 4.38 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра над зданием  $x=0$  м. на высоте пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.

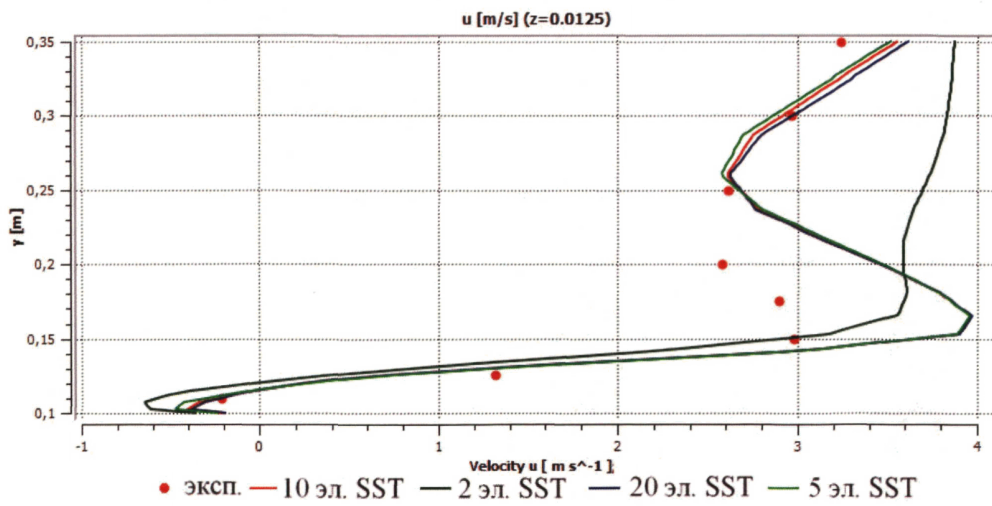


Рисунок 4.39 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра над зданием  $x=0.025$  м. на высоте пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.

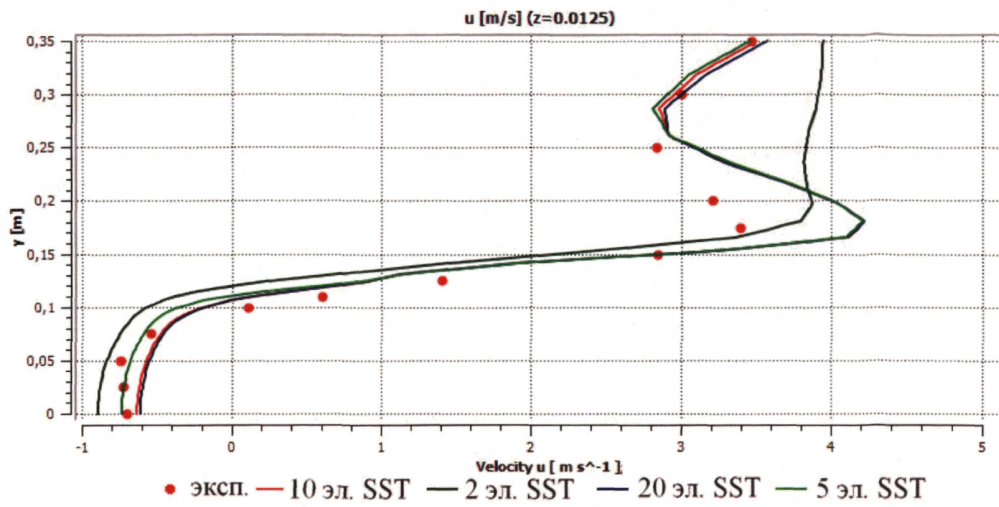


Рисунок 4.40 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра за зданием  $x=0.05$  м. на высоте пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.

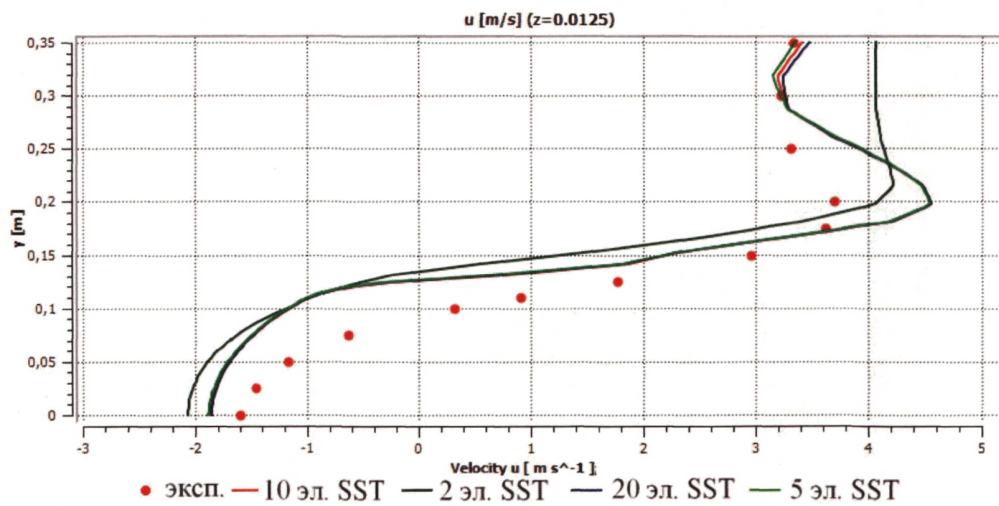


Рисунок 4.41 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра за зданием  $x=0.1$  м. на высоте пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.

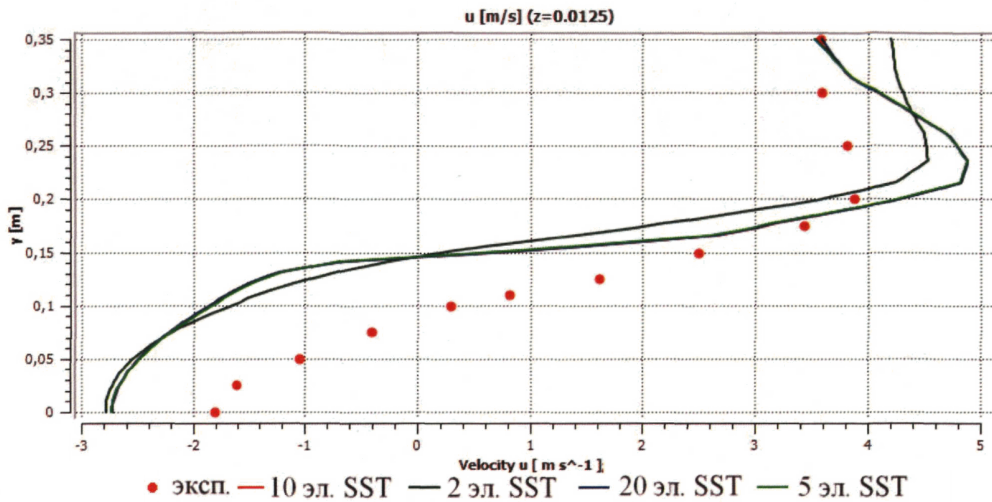


Рисунок 4.42 — Распределение горизонтальной составляющей скорости ветра за зданием  $x=0.2$  м. на высоте пешеходной зоны  $z=0.0125$  м.

Приведенная погрешность для различных сеток приведена в таблице 4.4.

Таблица 4.4. - Приведенная относительная погрешность между результатами эксперимента и численным моделированием с использованием модели турбулентности SST для различных сеток.

SST% (2 элемента)	SST% (5 элементов)	SST% (10 элементов)	SST% (20 элементов)	
3,78	3,58	3,64	3,66	По высоте
15,53	8,97	8,81	8,86	На уровне пешехода

По полученным результатам можно говорить о том, что количество делений сетки до пешеходного уровня существенно влияет на картину распределения скоростей ветра на пешеходном уровне. Так сетка с двумя ячейками по высоте вообще не отражает картину течения, результаты для сеток с 5, 10 и 20 делениями показывают практически одинаковые значения. Таким образом, можно сделать вывод, что оптимальным решением будет использование сеток с 5 делениями по высоте до уровня пешехода. Но мы рекомендуем использовать 10 делений для возможности учета пешеходной комфортности для детей.

Следующим шагом задача решалась в нестационарной постановке. Результаты моделирования показывают, что приведенная относительная погрешность между результатами эксперимента и численным моделированием составляет 4.8% для центрального сечения по высоте, и 9.36% для пешеходного уровня. Таким образом, можно говорить о том, что решение задач пешеходной комфортности в стационарной постановке достаточно при использовании эквивалентной скорости ветра, включающей пульсационную составляющую.

#### **4.4. Моделирование живой изгороди**

Посадка деревьев и живых изгородей является одной из наиболее популярных мер по снижению ветрового воздействия на человека [27,39,87].

При численном моделировании зеленых насаждений возникает проблема моделирования самой области дерева, которая связана с тем, что дерево пропускает через свою крону часть воздушных потоков.

В данной работе описаны построение численной модели живой изгороди и сравнение результатов с натурными испытаниями, проведенными в Японском архитектурном институте [93].

Была рассмотрена задача о ветровых потоках вблизи живой изгороди, превышающий человеческий рост.

Японскими учеными под руководством А. Мочиды, Й. Тобато был проведен натуральный эксперимент о влиянии деревьев на ветровые потоки. В данной работе используются полученные ими результаты.

Модель, для которой проводились натурные испытания, представлена на рисунке 4.43. Высота изгороди составляет 7 м, ширина 2 м, набегающий поток задан. Расчетная схема представлена на рисунке 1.

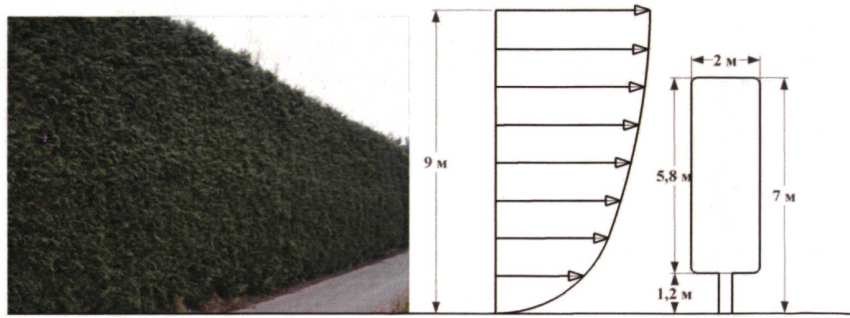


Рисунок 4.43 — Моделируемый объект и расчетная схема.

Замеры проводились на расстояниях  $0,25H$ ,  $0,5H$ ,  $H$ ,  $2H$ ,  $3H$ ,  $4H$ ,  $5H$  от модели в четырех точках по высоте: 1,5 м, 3 м, 4,5 м, 6 м. Измерялись приведенная скорость и приведенная кинетическая энергия турбулентности (Результаты в таблицах 4.5 и 4.6).

Таблица 4.5- Приведенная скорость (натурные испытания)

Z[m]	X/H						
	0,25	0,5	1	2	3	4	5
1,5	0,386	0,412	0,475	0,521	0,533	0,500	0,473
3	0,547	0,455	0,403	0,408	0,451	0,466	0,462
4,5	0,600	0,488	0,404	0,386	0,449	0,492	0,495
6	0,462	0,494	0,457	0,463	0,526	0,582	0,586

Таблица 4.6- Приведенная кинетическая энергия турбулентности (натурные испытания)

Z[m]	X/H						
	0,25	0,5	1	2	3	4	5
1,5	0,011	0,013	0,016	0,020	0,037	0,034	0,040
3	0,021	0,016	0,014	0,015	0,031	0,033	0,043
4,5	0,026	0,025	0,014	0,018	0,037	0,044	0,054
6	0,026	0,025	0,027	0,034	0,052	0,069	0,072

Поставленная задача решалась в двумерной постановке. Были заданы следующие граничные условия: на "входе" в модель задавался поток, который был измерен при натурных испытаниях; на "выходе" граничные условия, обеспечивающиеся постоянным статическим давлением, на верхней границе – условие симметрии, на нижней границе – "стенка" с условием "no slip". Использовалась модель турбулентности SST. Живая изгородь была задана, как

изотропная пористая область. Потери импульса, через которую могут быть сформулированы на основе проницаемости и коэффициентов потери следующим образом:

$$S_{M.x} = -K_{loss} \frac{\rho u}{2} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$$

$$S_{M.y} = -K_{loss} \frac{\rho v}{2} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$$

$$S_{M.z} = -K_{loss} \frac{\rho w}{2} \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$$

При численном решении задачи нами подбирался коэффициент потерь таким образом, чтобы результаты были наиболее близки к результатам натурального эксперимента. Оценивалась эквивалентная скорость  $V_e = V + 1.5\sqrt{TKE}$  [15].

При оценке подбора коэффициента оценивалась средняя арифметическая ошибка для всех точек замера. В результате были получены результаты, представленные в таблице 4.7.

Таблица 4.7- Отклонение результатов, полученных при численном моделировании для различных коэффициентов проницаемости и натуральных испытаний.

$K_{loss}$	0,1	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	4	5	6
%	8,76	2,72	1,99	1,71	1,65	1,7	2,01	2,36	2,66	2,95	3,89	4,57	5,11

Как видно, наиболее точный результат получен при коэффициенте  $K_{loss} = 1,75 \text{ m}^{-1}$ .

Ниже представлена таблица с результатами ошибки для подобранного коэффициента по всем точкам.

Таблица 4.8- Сравнительная таблица результатов, полученных при численном моделировании для коэффициента  $K_{loss} = 1,75 \text{ m}^{-1}$  и натуральных испытаний.

№п.п.	X/H	Z	$V_e$ (Численное моделирование)	$V_e$ (Натурные испытания)	Погрешность, %
1	0,25H	1,5	1,725278	1,5525	11,13
2		3	1,673089	1,7285	3,21
3		4,5	1,677731	1,789	6,22
4		6	1,679589	1,651	1,73
5	0,4H	1,5	2,880385	2,7315	5,45
6		3	2,799261	2,779	0,73
7		4,5	2,792179	2,8255	1,18
8		6	2,821419	2,8315	0,36
9	H	1,5	4,008653	3,949	1,51
10		3	3,919878	3,874	1,18

11		4,5	3,906531	3,875	0,81
12		6	3,970828	3,9475	0,59
13	2Н	1,5	5,110894	5,151	0,78
14		3	5,039675	5,0305	0,18
15		4,5	5,045046	5,013	0,64
16		6	5,152345	5,114	0,75
17	3Н	1,5	6,228097	6,3385	1,74
18		3	6,183089	6,2475	1,03
19		4,5	6,217574	6,2545	0,59
20		6	6,344908	6,354	0,14
21	4Н	1,5	7,353825	7,451	1,30
22		3	7,34386	7,4155	0,97
23		4,5	7,403591	7,458	0,73
24		6	7,534372	7,5855	0,67
25	5Н	1,5	8,490189	8,583	1,08
26		3	8,51577	8,5765	0,71
27		4,5	8,590753	8,626	0,41
28		6	8,718118	8,744	0,30
29	Средняя арифметическая ошибка по всем точкам измерения, %				1,65

При анализе результатов можно сделать следующий вывод: на расстоянии 0,25Н на высоте 1,5м результаты численного моделирования сходятся меньше всего, вероятнее всего это связано с тем, что ствол дерева, имеет отличную проницаемость от кроны. Тем не менее, ошибка в 11,1% является удовлетворительной для данного класса задач.

Далее представлены изолинии эквивалентных скоростей ветра и приведенной кинетической энергии турбулентности при коэффициенте потери  $1,75\text{м}^{-1}$ .

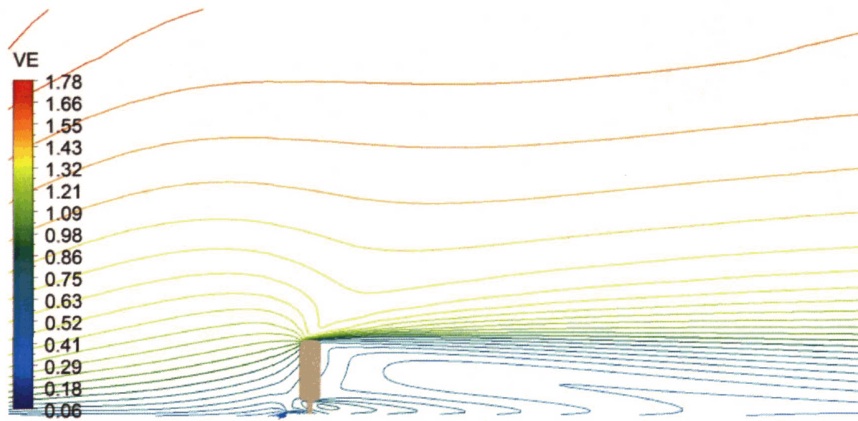


Рисунок 4.44 — Изолинии эквивалентных скоростей ветра.

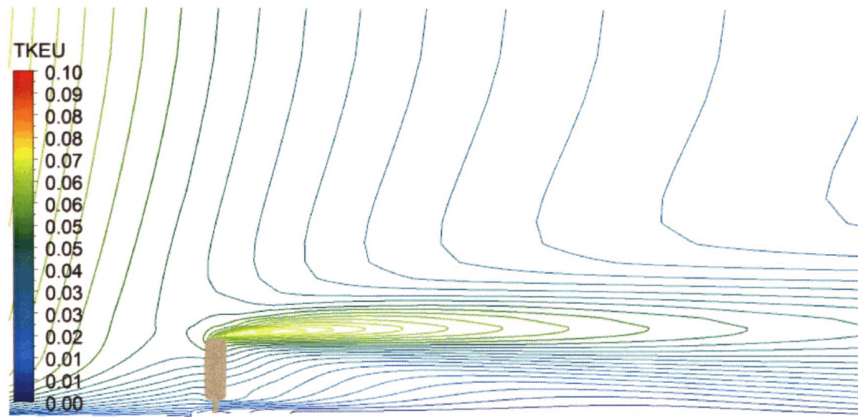


Рисунок 4.45 — Изолинии приведенной кинетической энергии турбулентности.

В результате проведенного сравнения результатов натуральных испытаний и численного моделирования был подобран коэффициент потери, при котором отклонение результата в среднем составляет 1,65%.

Рассмотрим отдельно пешеходный уровень ( $z=1.5$  м), а именно выведем на отдельные графики эквивалентные скорости и турбулентную кинетическую энергию, полученные в эксперименте и скорости, полученные при численном моделировании (рисунки 4.46-4.47).



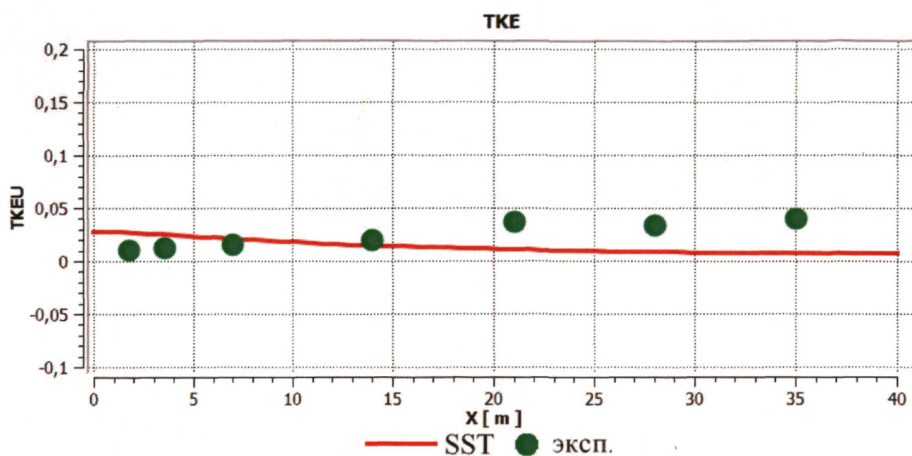


Рисунок 4.46 — Сравнение значений турбулентной кинетической энергии на уровне пешехода, полученных при натуральных замерах и при численном моделировании.

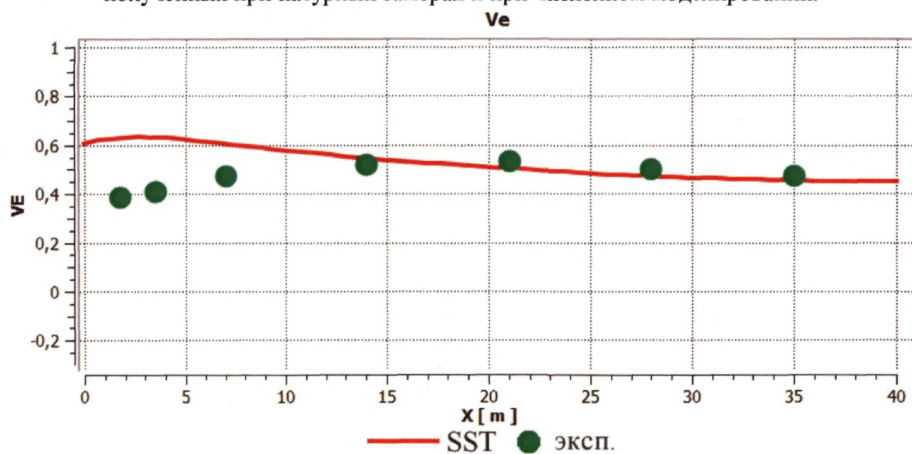


Рисунок 4.47 — Сравнение значений эквивалентной скорости ветра на уровне пешехода, полученных при натуральных замерах и при численном моделировании.

Относительная погрешность между численным моделированием и натурными замерами для эквивалентной скорости ветра на пешеходном уровне составила 3,28%

Таким образом, проведенное исследование позволит в дальнейшем использовать данную модель при численном моделировании жилых застроек для более точной оценки воздействия ветра на пешеходов, а так же для рекомендаций по улучшению ветрового режима территории.

#### 4.5. Численное моделирование эксперимента по продувке модели дерева в аэродинамической трубе

В настоящей задаче рассмотрено численное моделирование эксперимента по продувке модели дерева (рисунок 4.48). в аэродинамической трубе, описанного А.Мочидой (Япония).

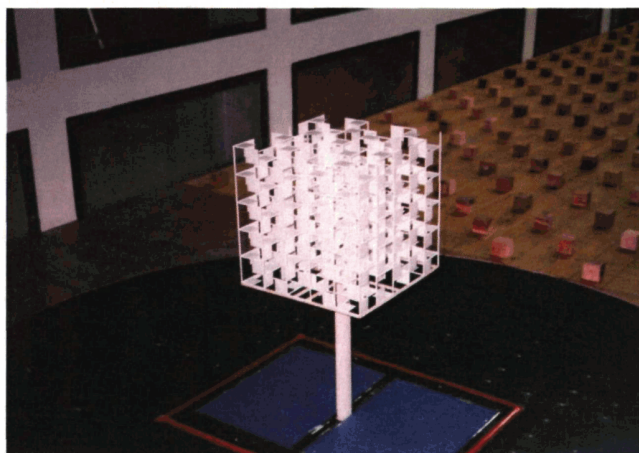


Рисунок 4.48 — Модель дерева в аэродинамической трубе.

При численном моделировании данной задачи использовался домен Immersed solids. Immersed solids (погруженные твердые тела) в ANSYS CFX позволяет моделировать в стационарном или нестационарном состоянии твердые объекты, которые могут перемещаться по доменам жидкости. Модель включает в себя использование Immersed Solid домена, который находится внутри домена жидкости. При моделировании процесса CFX-Solver использует источник импульса жидкости внутри погруженной области с целью заставить поток двигаться с твердым телом.

Было создано две сетки: сетка для области дерева (839 624 элемента), и сетка области пространства воздуха в аэродинамической трубе (2100 000 элемента).

Размеры дерева в аэродинамической трубе: крона  $0.3*0.3*0.3$ м, ствол  $0.02*0.02*0.3$ м.

Были заданы следующие граничные условия: на "входе" в модель задавалась скорость 3м/с; на "выходе" граничные условия, обеспечивающиеся постоянным статическим давлением, на верхней и нижней границах – "стенка" с условием "no slip". Использовалась модель турбулентности SST.

Задача решалась при стационарной постановке с использованием модели турбулентности SST.

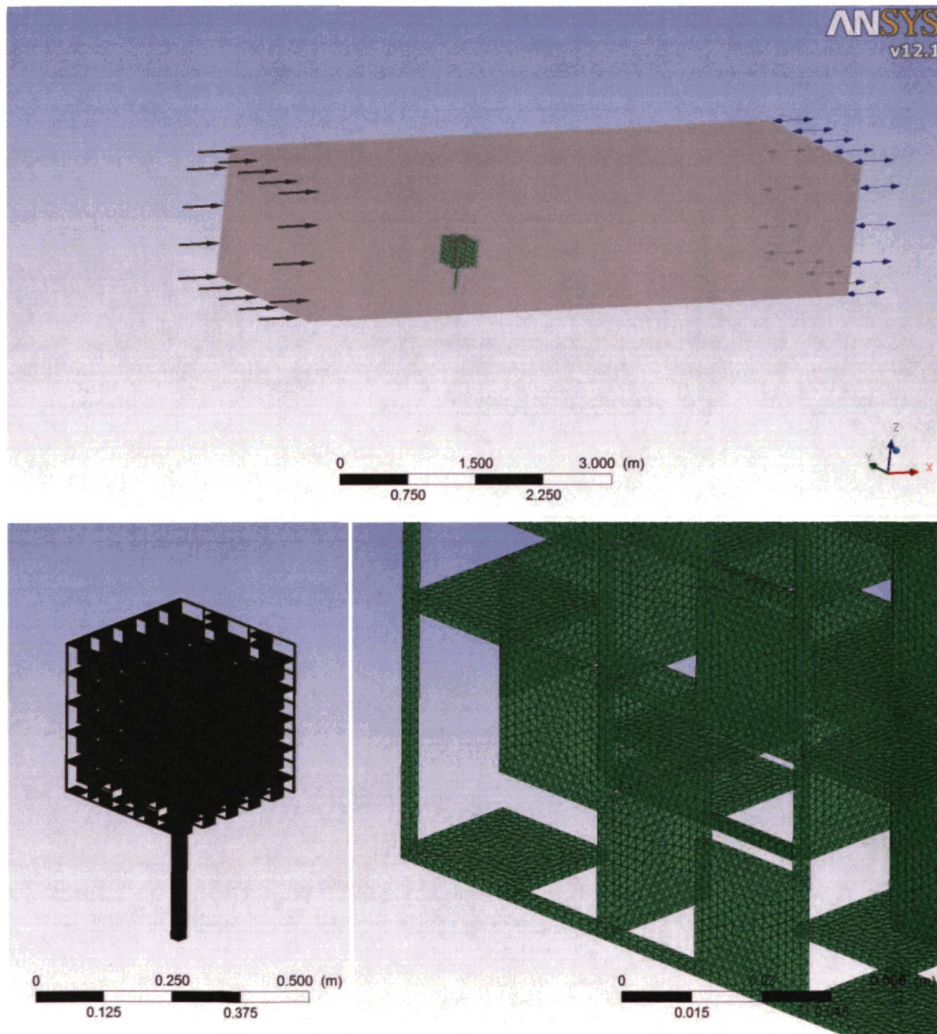


Рисунок 4.49 — Расчетная область и сетка.

В физическом эксперименте в аэродинамической трубе замеры проводились на двух высотах на высоте 0.45 м и на высоте 0.8 м. Далее представлены графики сравнения полученных результатов.

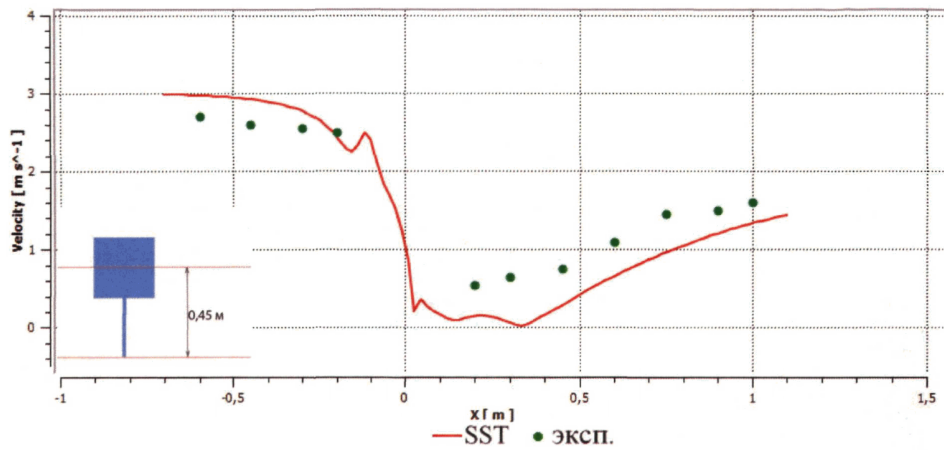


Рисунок 4.50 — Сравнение полученных результатов скорости ветра на высоте 0.45 м (красная линия – результаты, полученные при численном моделировании, зеленые круги – результаты, полученные в аэродинамической трубе).

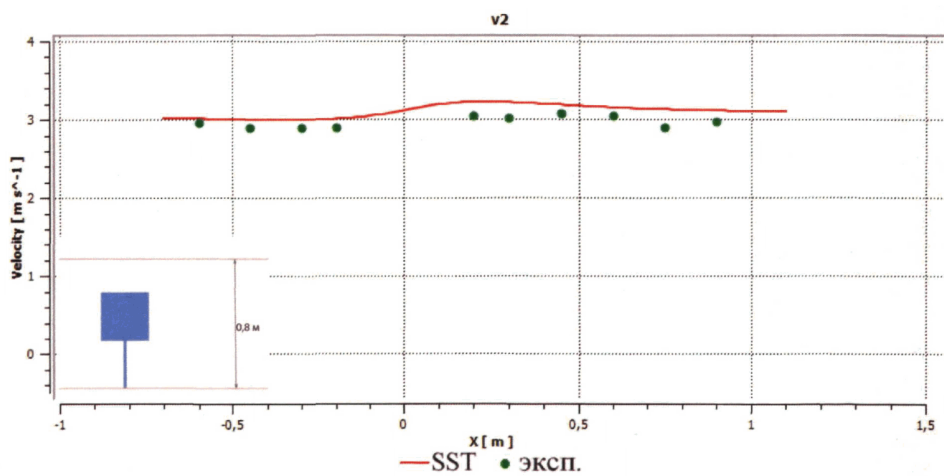


Рисунок 4.51 — Сравнение полученных результатов скорости ветра на высоте 0.8 м (красная линия – результаты, полученные при численном моделировании, зеленые круги – результаты, полученные в аэродинамической трубе).

Установлено, что на высоте 0.8 м отклонение результатов численного моделирования от результатов эксперимента составило 4.33%, а на высоте 0.45 м расчетные скорости за моделью ниже полученных в аэродинамической трубе - рассогласование результатов для данной высоты составило до 33.17%. Среднее отклонение результатов по всем точкам измерения составило 19.43%.

Следующим шагом рассматривалась эта задача при моделировании дерева в виде пористого тела. В результате расчетов было получено, что при таком способе моделирования результаты с моделированием в аэродинамической трубе не сходятся. На рисунке 4.52 представлены полученные результаты.

Такое разногласие результатов может быть связано как с тем, что такую модель дерева нельзя моделировать в виде изотропной пористой области, так и с тем, что моделирование трехмерных деревьев в виде изотропной пористой области вообще не возможно. Задача численного моделирования трехмерных деревьев требует дополнительного изучения.

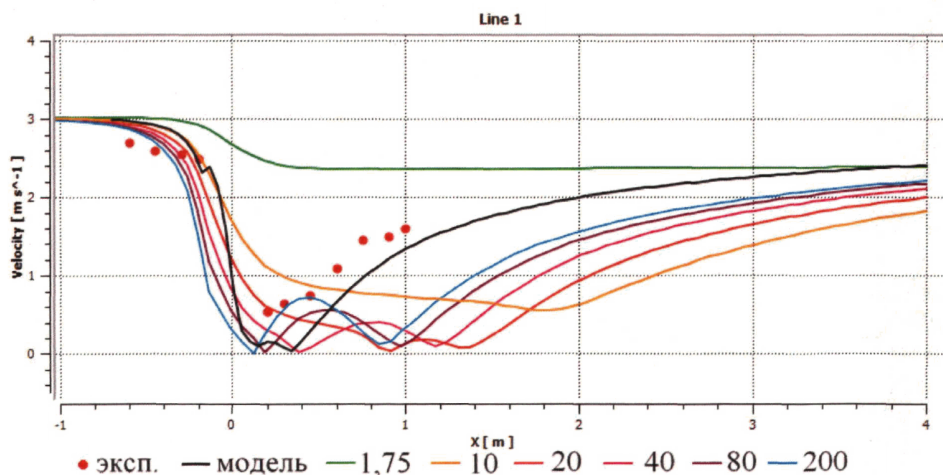


Рисунок 4.52 — Сравнение результатов численного моделирования при различных вариациях коэффициента проницаемости, экспериментальных данных (точки) и результатов моделирования первым способом (черная линия).

По полученным данным можно сделать следующие выводы:

- результаты прямого численного моделирования модели дерева

расходятся с результатами, полученными в аэродинамической трубе на 19.43%

- при представлении дерева в виде трехмерной изотропной пористой области численные результаты существенно и качественно не согласуются с экспериментальными данными.

#### 4.6. Выводы по главе

Проведенная верификация разработанной методики численного моделирования задач пешеходной комфортности и ее программной реализации на основе сравнения с результатами физического моделирования в аэродинамических трубах и с натурными замерами показала следующие результаты:

- Для комплекса из двух зданий в аэродинамической трубе среднее отклонение для всех точек измерения составило для модели SST – 13.16%, для модели k-ε RNG – 19.08%, для модели k-ε – 27.81%. Установлено, что для данной задачи результаты лучше всего согласуются с экспериментом при модели турбулентности SST.

- Для параллелепипеда с соотношением сторон 4:4:1 установлено, что результаты эксперимента и численного моделирования лучше всего сходятся при использовании модели турбулентности SST и для дискретизации задач пешеходной комфортности достаточным по высоте до пешеходного уровня является 5 элементов.

- В результате сравнения натуральных испытаний и численного моделирования для живой изгороди в двумерной постановке определен коэффициент потери ( $K_{loss}=1.75 \text{ м}^{-1}$ ), при котором отклонение результата в среднем составляет 1,65%. Для полученного коэффициента потери было проведено сравнение результатов эквивалентных скоростей ветра на пешеходном уровне, полученных с помощью численного моделирования и натуральных замеров. Рассогласование расчетных и экспериментальных результатов не превысило 3.28%.

- При численном моделировании продувки трехмерной модели дерева в

аэродинамической трубе Установлено, что на высоте 0.8 м отклонение результатов численного моделирования от результатов эксперимента составило 4.33%, а на высоте 0.45 м расчетные скорости за моделью ниже полученных в аэродинамической трубе - рассогласование результатов для данной высоты составило до 33.17%. При представлении дерева в виде трехмерной изотропной пористой области численные результаты существенно и качественно не согласуются с экспериментальными данными.

- Разработана методика моделирования зеленых насаждений, основанная на их представлении в виде «эквивалентных» пористых подобластей, показавшая адекватность результатов для задач в двумерной постановке, и требующая дальнейших исследований применительно к трехмерным задачам.

- "Матрица верификации" разработанной методики представлена в таблице 4.9.

Таблица 4.9 - "Матрица верификации" разработанной методики.

Описание задачи аэродинамики	"Эталоны"	Модель турбулентности	Модел и, тыс. ячеек	Расхождение, %
Комплекс из двух зданий	Эксперимент в НИИ Механики МГУ (аэродинамическая труба)	SST	2800	13,16
		k-ε RNG		19,08
		k-ε		27,81
Призма 4:1:1	Эксперимент АИУ (аэродинамическая труба)	BSL	1400	15,52 <sup>1</sup>
		k-ε RNG		14,09
		k-ω		16,24
		k-ε		18,69
		SST		8,81
"Живая" изгородь	Эксперимент АИУ (натурные замеры)	SST	152	3,28 <sup>2</sup>
Модель дерева	Эксперимент А. Мочиды (аэродинамическая труба)	SST	2850	19,43

<sup>1</sup> Расхождение для пешеходного уровня.

<sup>2</sup> Расхождение для пешеходного уровня.

## Глава 5. Практическое применение разработанной методики

### 5.1. Численное моделирование пешеходной комфортности на территории кампуса Технического университета г. Эйндховен

Одной из верификационных задач разработанной методики была выбрана задача обтекания здания Технического университета Эйндховена, который расположен на юге Нидерландов. Его координаты: 51,26 с.ш. и 5,30 в.д.



Рисунок 5.1 — Фотография западного фасада главного здания университета.

Рельеф данной местности плоский. До ближайших холмов и Северного моря, по меньшей мере, 80 км. Преобладающие направления ветра: западный и юго-западный. По данным Метеостанции Эйндховена была сделана выборка архива погоды за 2011 год и создана таблица направления и повторяемости ветров на высоте 10 м. (в %), которая потом использовалась при оценке пешеходной комфортности. Полученное распределение представлено в таблице 5.1.



Таблица 5.1. Направление и повторяемость ветров на высоте 10 м (проценты), по данным метеостанции г.Эйндховен.

Угол	Скорость ветра, м/с (%)								
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17
С	3,11	0,32	0,24	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ССВ	3,89	0,54	0,28	0,06	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
СВ	4,15	0,73	0,83	0,32	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
СВВ	1,30	0,53	0,47	0,34	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
В	2,34	0,60	0,29	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ВЮВ	3,11	0,54	0,16	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ЮВ	6,49	1,37	0,58	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ЮЮВ	6,75	0,74	0,31	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ю	5,97	1,02	0,63	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
ЮЮЗ	7,27	0,90	0,80	0,51	0,13	0,06	0,00	0,00	0,00
ЮЗ	8,82	1,64	2,16	1,61	0,65	0,22	0,01	0,00	0,00
ЗЮЗ	5,19	0,72	0,94	0,73	0,29	0,10	0,06	0,00	0,00
З	3,37	0,71	0,61	0,27	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
ЗСЗ	4,15	0,72	0,59	0,28	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
СЗ	3,89	0,46	0,23	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ССЗ	2,85	0,19	0,15	0,08	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

Здание расположено к северу от центра города. Оно имеет следующие размеры: высота  $H = 44,6$  м, ширина  $W = 167$  м и глубина  $D = 20$  метров и точную ориентацию на север-юг, фасады здания: западный и восточный

Для рассматриваемого университета проводились натурные испытания в 1994-1997 гг., но результаты этих испытаний в литературе не встречаются. К.П.В. Гертсом в 1997 году была проведена серия экспериментов в аэродинамической трубе Лаборатории Строительной Аэродинамики, Бохум, Германия. Результаты,

полученные в ходе эксперимента в аэродинамической трубе отражены в работе [65].

Модель была сконструирована в масштабе 1: 350. Тест проводился при средней скорости ветра 14м/с. На наветренной стороне было установлено 42 датчика давления на высотах 0.97Н, 0.72Н и 0.61Н.

Для численного моделирования скоростей ветра в пешеходных зонах кампуса технического университета Эйнховена была построена модель, которая составила примерно 1.5 миллиона узлов и 4.32 миллиона ячеек (2.3 миллиона тетраэдральных, 2 миллиона призматических и 0.02 млн. гексаэдральных ячеек). Сетка в приземной области была получена "выдавкой" до нулевой высоты (10 элементов общей высоты 2,5 м). Такой подход обеспечил достаточную и экономичную дискретизацию потоков в пешеходных зонах. Полная расчетная область представляет собой цилиндр радиусом 793 м и высотой 577 м (рисунок 5.2).

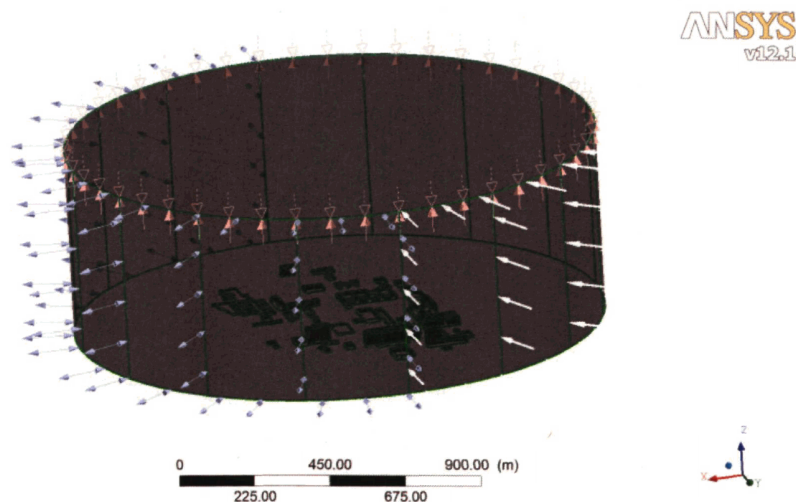


Рисунок 5.2 — Модель кампуса технического университета Эйнховена.

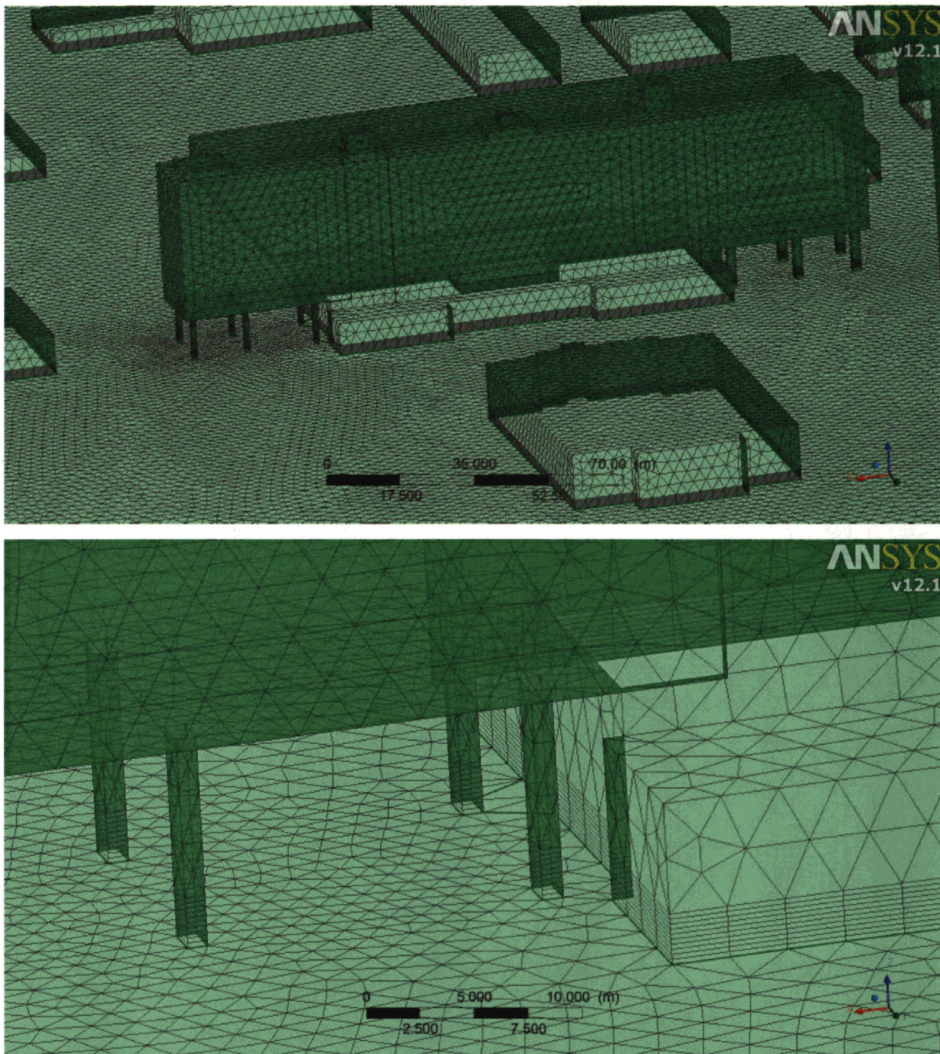


Рисунок 5.3 — Кампус технического университета Эйндховена. Поверхностная сетка.

Для области расчета задан тип среды – идеальный газ при температуре 285K и давлении 1 атм. Задача рассматривалась в изотермической постановке.

При подготовке модели в препроцессоре ANSYS всем группам поверхностей (компонентам) были присвоены соответствующие наименования для удобства присвоения в CFX граничных условий. В частности на боковой поверхности создано 16 компонент (участки по  $22.5^{\circ}$ ).

Для каждого направления ветра выбирается восемь компонент для граничного условия типа «вход» (INLET в терминах CFX), для иных восьми – условие, позволяющее потоку как выходить из расчетной области, так и входить в нее (OPENING в терминах CFX). На условии OPENING задано избыточное давление 0 Па.

На верхней поверхности расчетной области (высота 577 м) задано условие симметрии, обеспечивающее горизонтальность потока. На нижней поверхности расчетной области и на поверхности сооружения заданы условия непротекания и прилипания "no slip".

Масштаб турбулентности принят равным 100м в соответствии с рекомендациями Eurocode [57] для открытой местности

В задаче на “входе” в область задается скорость потока и кинетическая энергия турбулентности (изменяющиеся по высоте в соответствии с положениями СНиП).

Нижней поверхности (поверхности земли) задается условие типа "no slip" с типичной высотой шероховатостей. По опыту расчетов и по результатам вычислительных экспериментов назначена величина 0.1м.

Поверхностям зданий было задано условие типа "no slip" без шероховатостей.

Расчеты проводились с использованием модели турбулентности SST вплоть до достижения всеми неизвестными относительной среднеквадратичной нормы невязок  $10^{-5}$ .

По результатам предварительных расчетов сетка была скорректирована в ряде зон, а также было подобрано значение эквивалентной шкалы "псевдовремени", монотонно ускоряющее сходимость. "Хорошая" сходимость (около 70-80 итераций) позволила сделать вывод о рациональности принятой сетки и параметров итераций.

Были назначены необходимые параметры и переменные для мониторинга в процессе счета и удобства обработки результатов.

Для верификации задачи сначала рассматривался западный ветер. На рисунках 5.4-5.6 представлены скорости ветра на трех плоскостях: на высоте 1.5м, 10м и 20м.

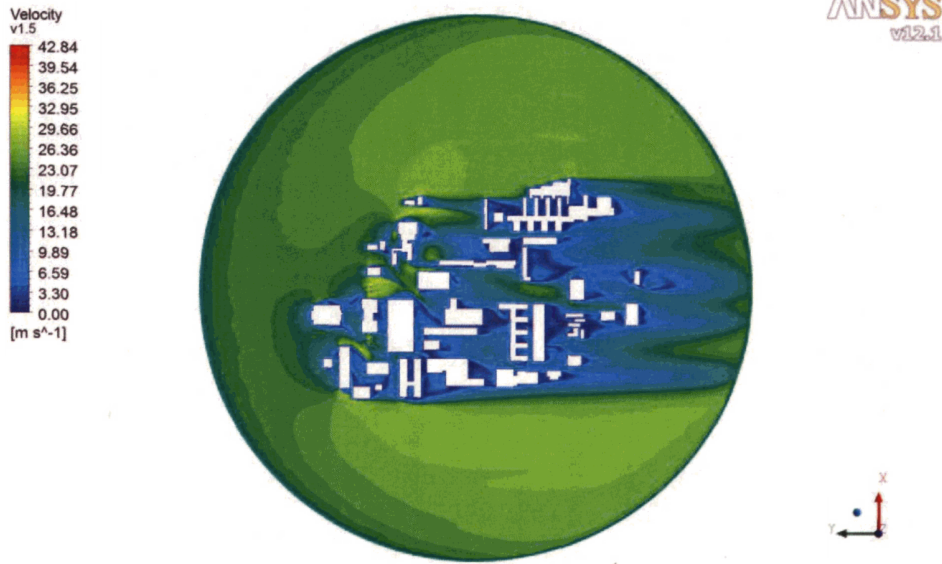


Рисунок 5.4 — Распределение скоростей ветра на высоте уровне 1.5м для западного направления.

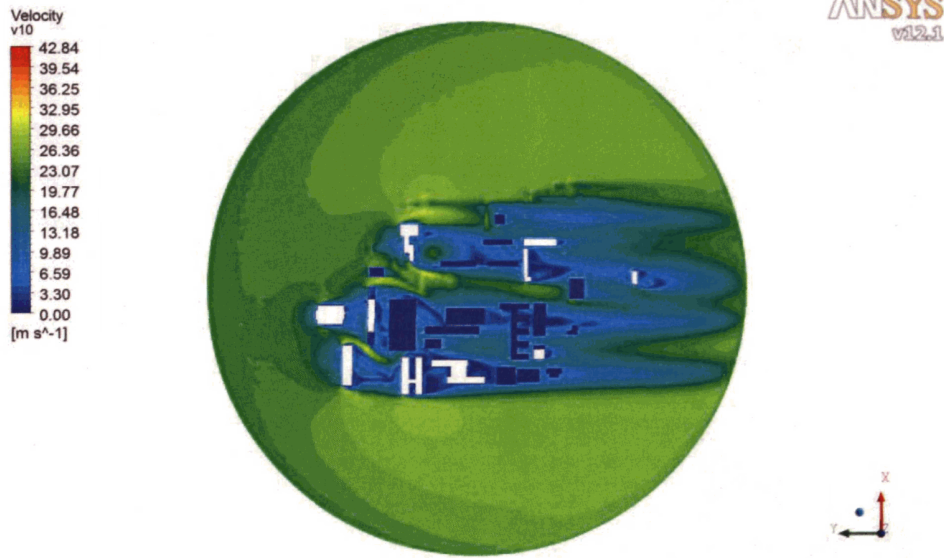


Рисунок 5.5 — Распределение скоростей ветра на высоте уровне 10м для западного направления.

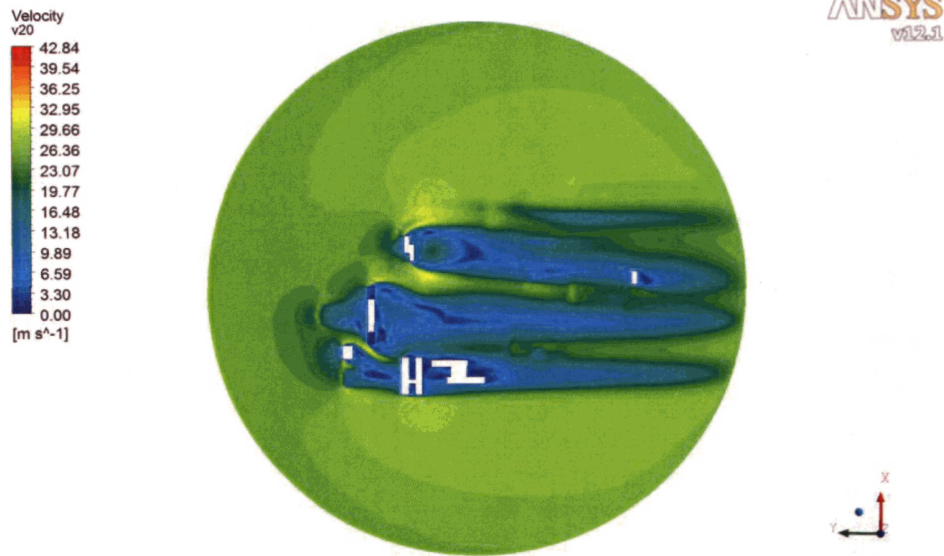


Рисунок 5.6 — Распределение скоростей ветра на высоте уровне 20м для западного направления.

Результаты численного моделирования хорошо совпали с результатами, полученными в аэродинамической трубе. Так на рисунках 5.7-5.9 представлены графики сравнения коэффициентов давления для западного направления ветра западный фасад. После верификации был проведен расчет остальных 15 направлений ветра. При верификации использовалась модель без окружающей застройки, только те здания, которые "продувались" в аэродинамической трубе.

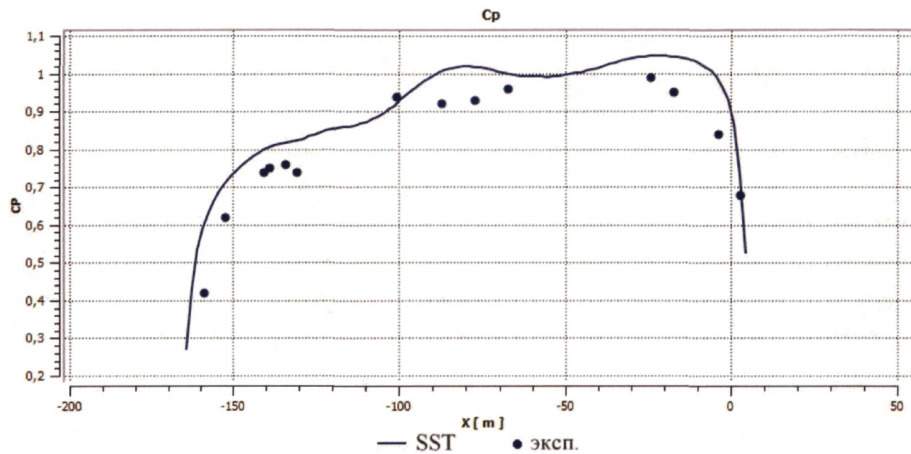


Рисунок 5.7 — Коэффициенты давления  $C_p$  на уровне  $0.61H$  для численного моделирования (сплошная линия) и моделирования в аэродинамической трубе (точки).

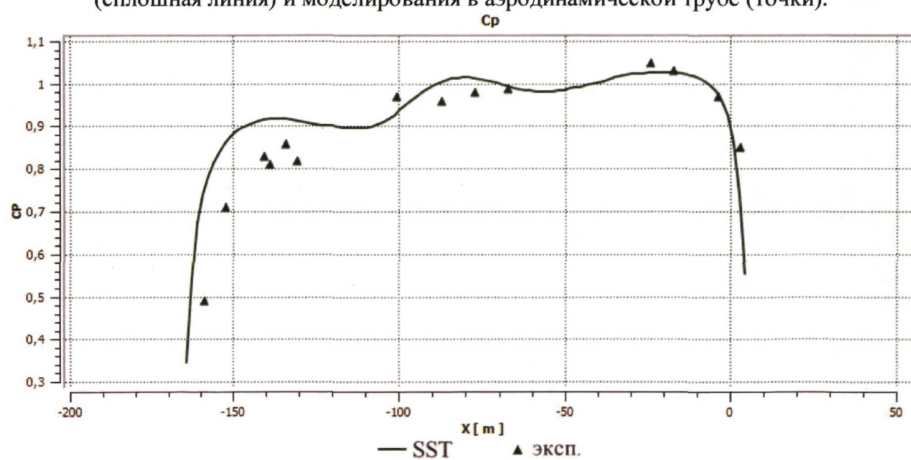


Рисунок 5.8 — Коэффициенты давления  $C_p$  на уровне  $0.72H$  для численного моделирования (сплошная линия) и моделирования в аэродинамической трубе (точки).

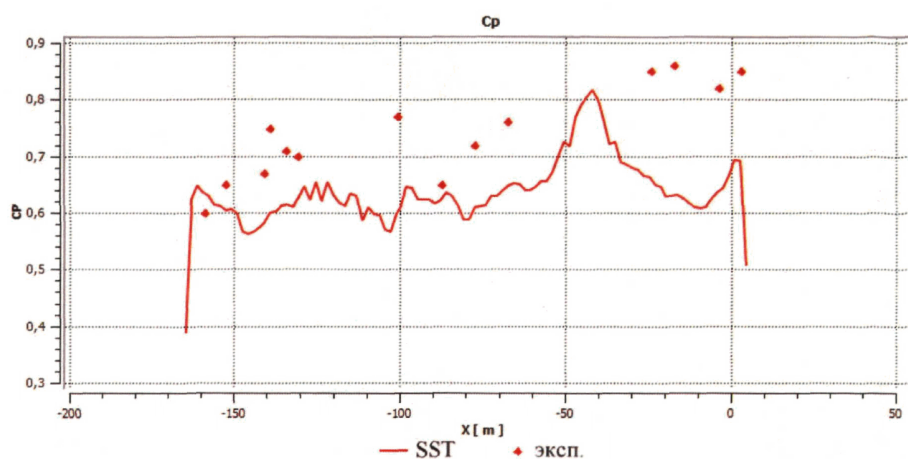


Рисунок 5.9 — Коэффициенты давления  $C_p$  на уровне  $0,97H$  для численного моделирования (сплошная линия) и моделирования в аэродинамической трубе (точки).

После верификации для западного направления ветра был сделан расчет для оставшихся 15 направлений ветра (рисунок 5.10).

Расчеты выполнялись на кластере НОЦ КМ МГСУ.

Количество вычислительных узлов – 25, количество вычислительных ядер – 300. Объем ОЗУ – 600 Гб. Емкость основной СХД – 7,8 Тб.

Для хранения данных используется параллельная файловая система PanFS, интерконнект – QDR Infiniband.

Параметры вычислительного узла: Два процессора IntelXeon с 6 ядрами каждый с тактовой частотой 2,93 ГГц, 24 Гб ОЗУ. Имеется два GPGPU вычислителя Tesla S2050.



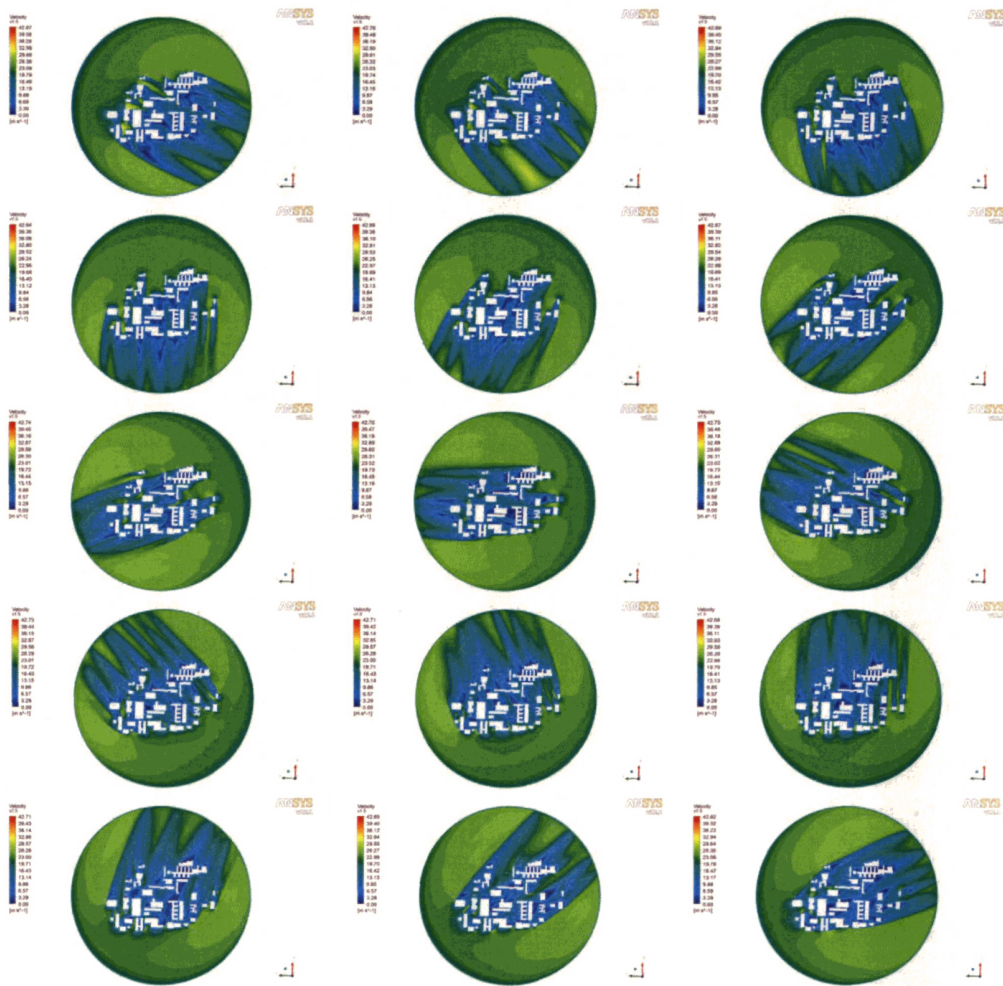


Рисунок 5.10 — Скорость ветра на уровне 1.5м для 15 направлений ветра.

После расчета 16 направлений ветра были сгенерированы файлы \*.csv для обработки в разработанном программном модуле. Обработка результатов была проделана для всех норм, заложенных в программном модуле с учетом пульсационной составляющей скорости и без нее рисунки 5.11-5.18.

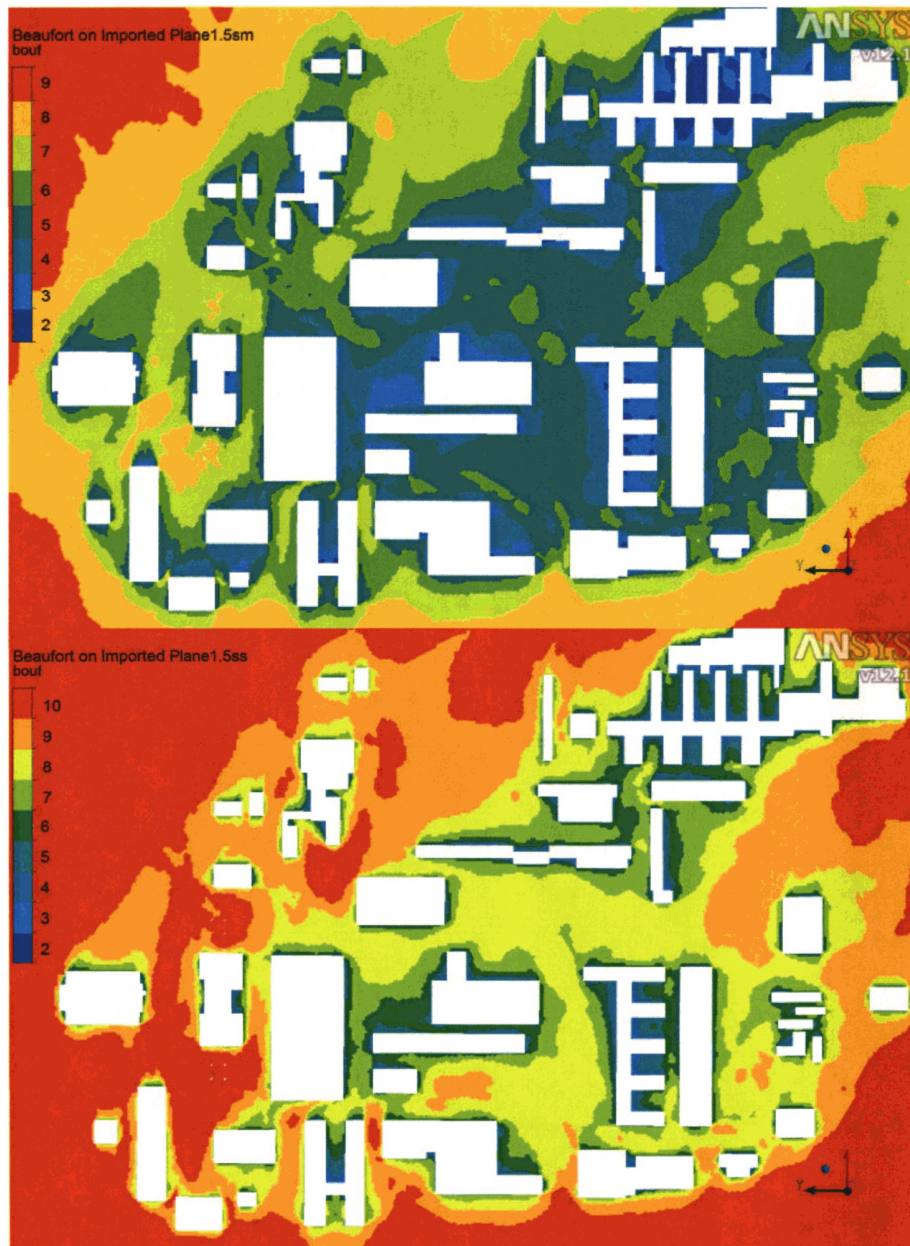


Рисунок 5.11 — Результаты для шкалы Бофорта без учета пульсационной составляющей (сверху) и с учетом (снизу).

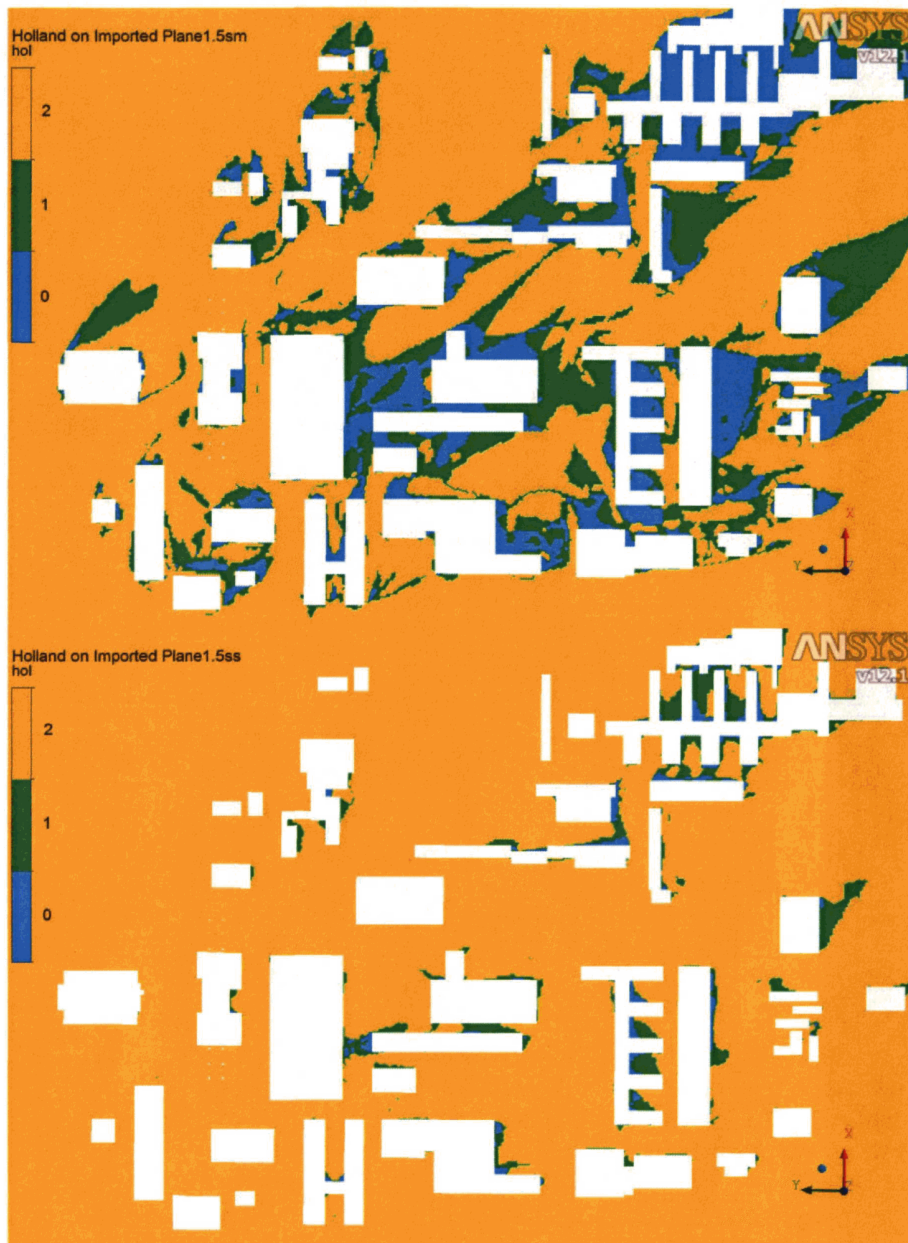


Рисунок 5.12 — Результаты для Голландских норм без учета пульсационной составляющей (сверху) и с учетом (снизу).

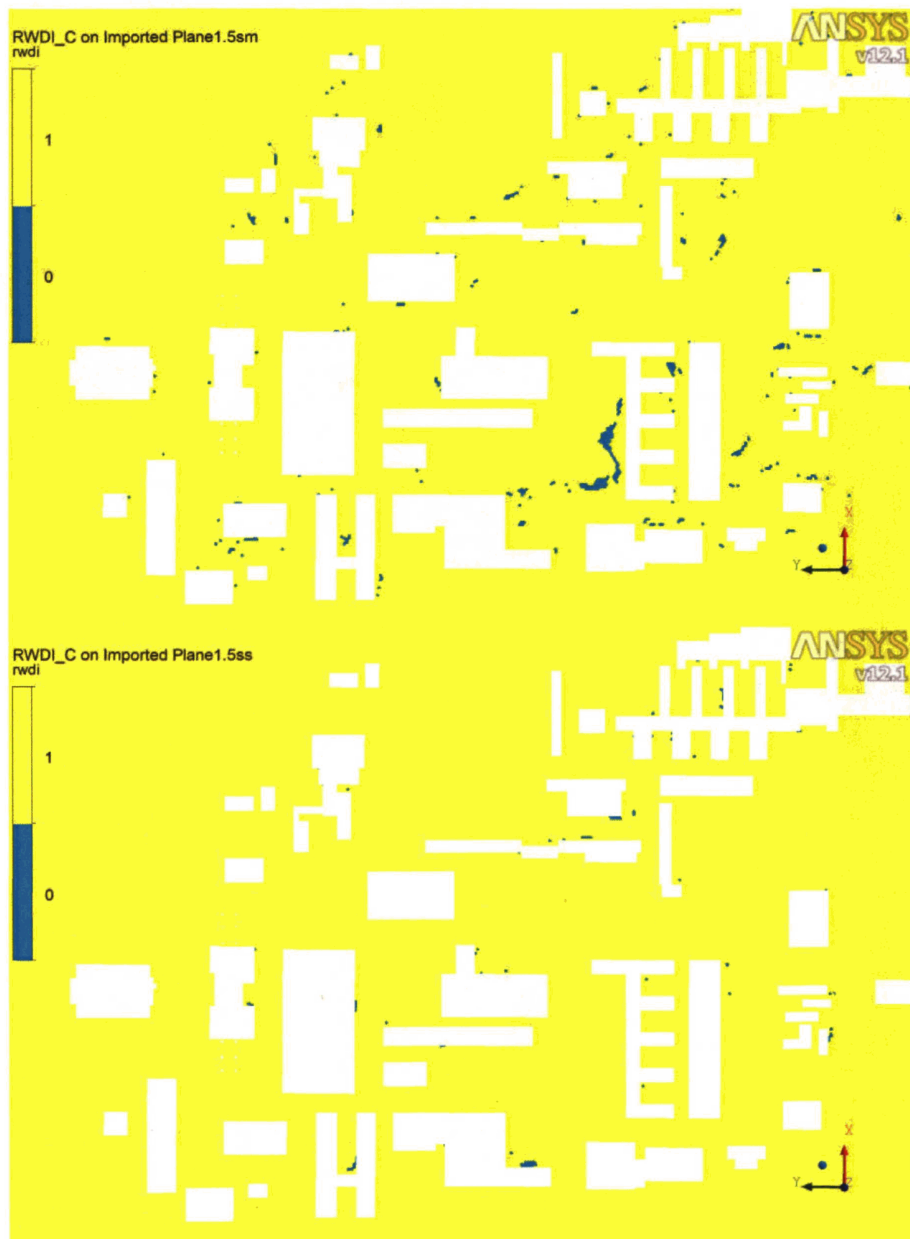


Рисунок 5.13 — Результаты для норм RWDI без учета пульсационной составляющей (сверху) и с учетом (снизу).

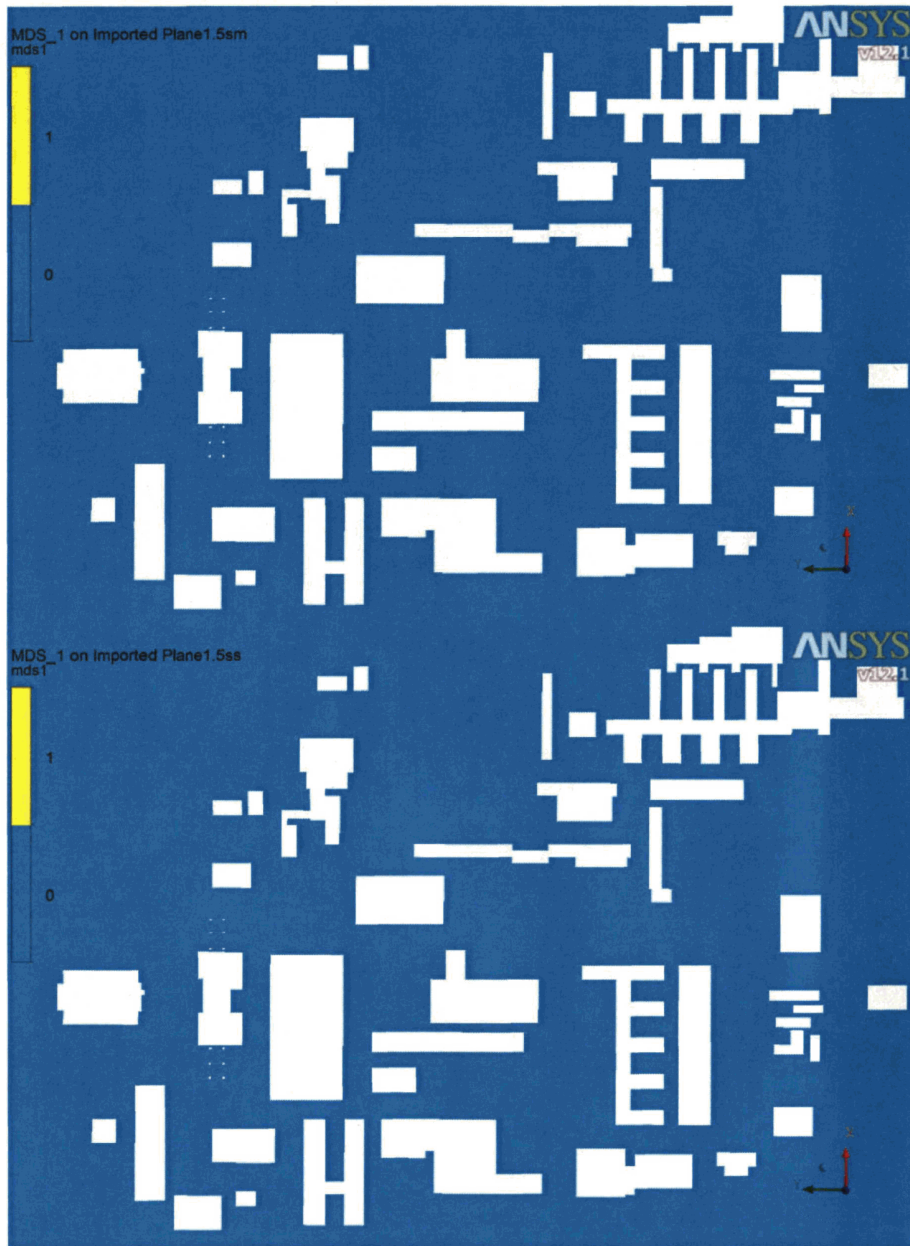


Рисунок 5.14 — Результаты для норм МДС 1 критерий без учета пульсационной составляющей (сверху) и с учетом (снизу).

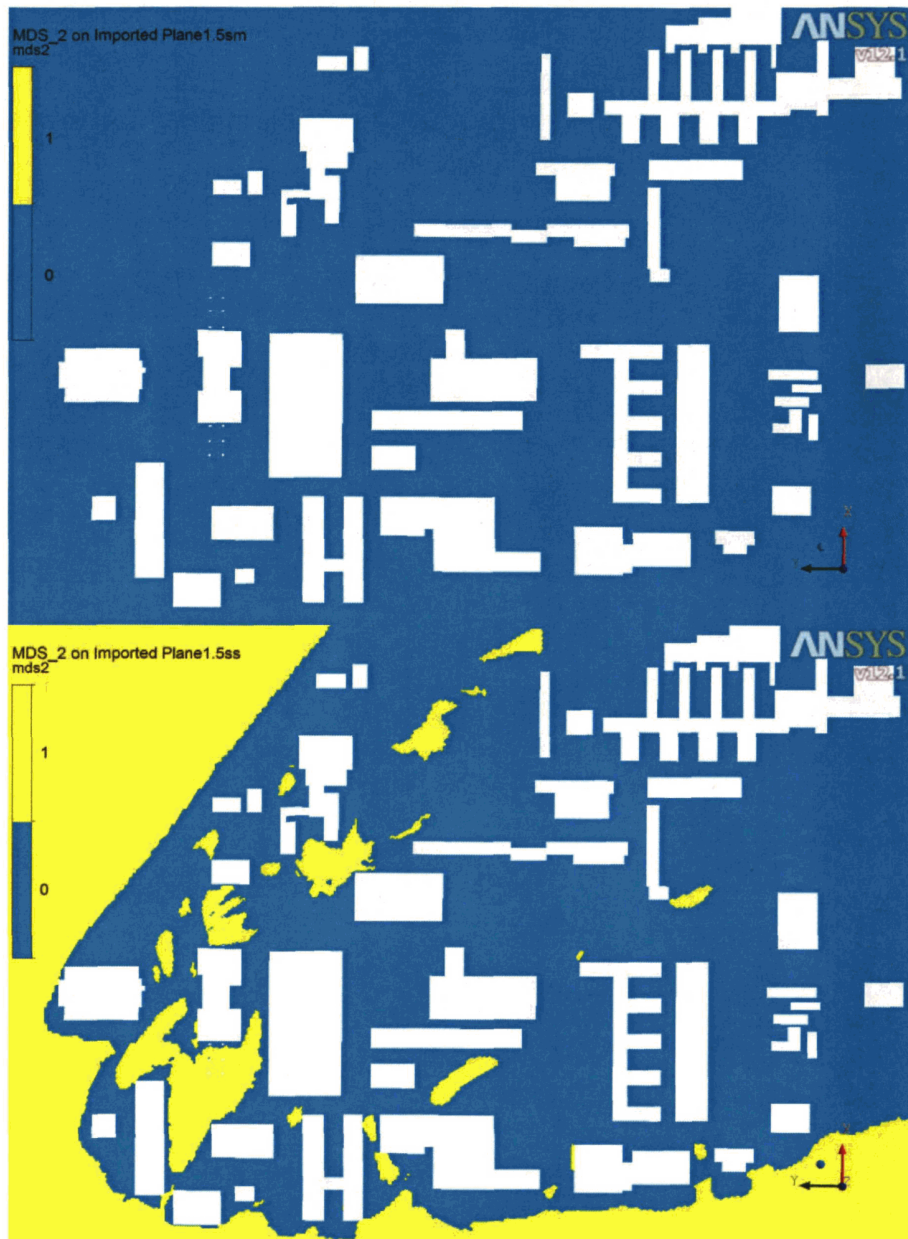


Рисунок 5.15 — Результаты для норм МДС 2 критерий без учета пульсационной составляющей (сверху) и с учетом (снизу).



Рисунок 5.16 — Результаты для норм МДС 3 критерий без учета пульсационной составляющей (сверху) и с учетом (снизу).

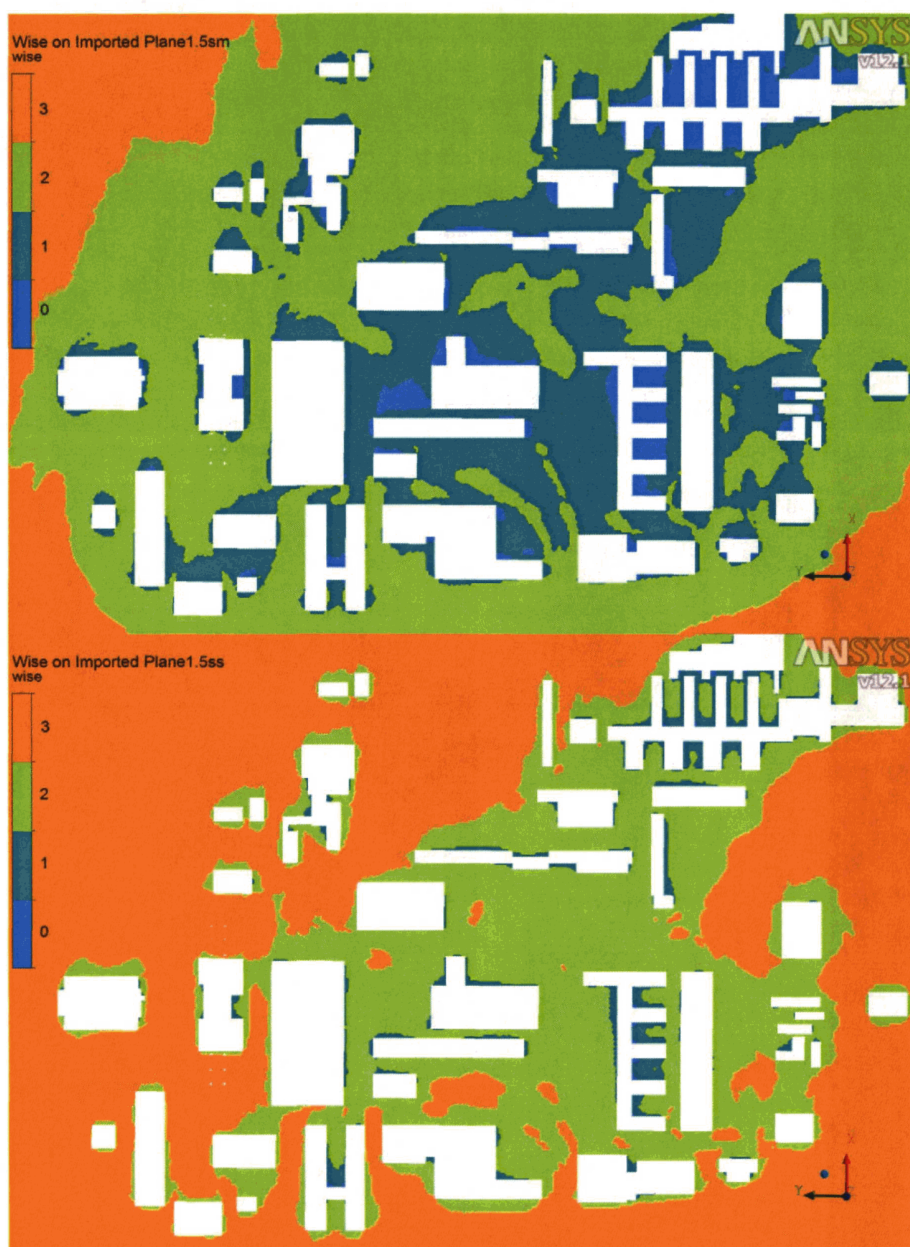


Рисунок 5.17 — Результаты для норм Вайса без учета пульсационной составляющей (сверху) и с учетом (снизу).



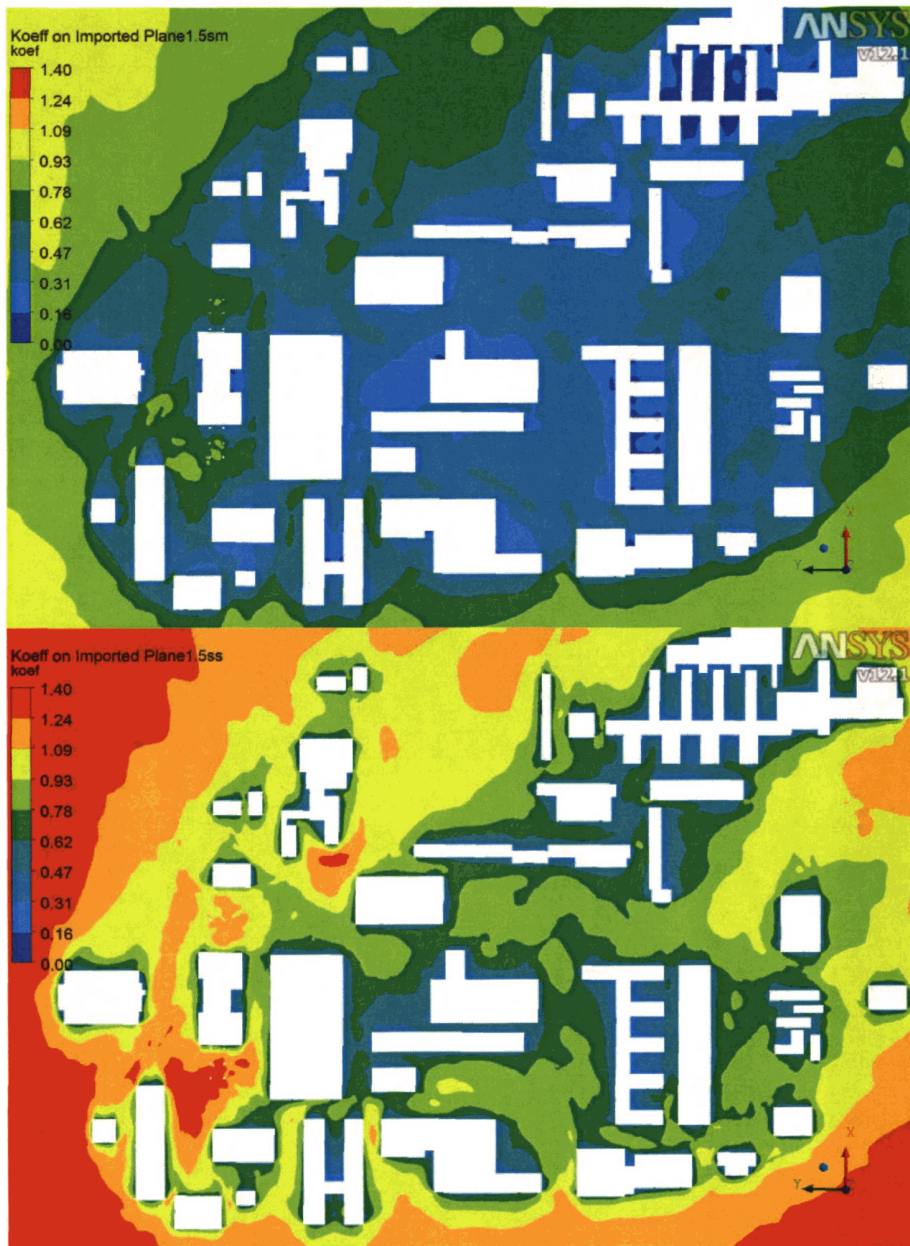


Рисунок 5.18 — Результаты для разработанной методики относительных скоростей без учета пульсационной составляющей (сверху) и с учетом (снизу).

По результатам для шкалы Бофорта, которая изменяется от 0 до 10, можно сделать следующие выводы: без учета пульсационной составляющей бальность

по шкале на территории кампуса составляет 3-6, что можно считать удовлетворительным, в районе главного корпуса у колонн бальность составляет 7-9, что можно считать неудовлетворительным. При учете пульсационной составляющей бальность по шкале на территории кампуса составляет 6-8, что уже нельзя считать удовлетворительным, в районе главного корпуса у колонн бальность составляет 9-10, что можно считать критичным. В целом обстановку на территории кампуса университета по шкале Бофорта с учетом пульсационной составляющей можно охарактеризовать неудовлетворительной.

По результатам для норм Нидерландов (где и расположен комплекс зданий), которые изменяются от 0 до 4, можно сделать следующие выводы для средней скорости ветра без учета пульсационной составляющей: на территории кампуса бальность по этой шкале изменится от 0 до 2, следовательно зон, для которых более 10% времени дует ветер более 5 м/снет. На территории кампуса бальность по шкале изменяется от 0 до 2, в районе главного корпуса у колонн она составляет 2 балла. По результатам для скорости ветра с учетом пульсационной составляющей практически на всей территории балл по шкале равен двум, что интерпретируется самими нормами как «хорошо» для быстрой ходьбы, «удовлетворительно» для прогулок и «плохо» для сидения на открытом воздухе.

Нормы для оценки пешеходной комфортности, разработанные Т.В. Лоусоном и используемые в RWDI, соответствующие прогулке пешеходов не выполняются практически на всей территории кампуса, как без учета пульсационной составляющей, так и с учетом.

Рассмотрим результаты оценки по МДС. Первый критерий (скорость ветра более 6 м/с повторяется не более 1000 часов в год) выполняется на всей территории кампуса как без учета пульсационной составляющей, так и без ее учета. Второй критерий (скорость ветра более 12 м/с повторяется не более 50 часов в год) выполняется на всей территории кампуса без учета пульсационной составляющей; с учетом пульсационной составляющей критерий не выполняется в районе главного корпуса у колонн, а также в некоторых зонах на территории кампуса. Третий критерий (скорость ветра более 20 м/с повторяется не более 5

часов в год) выполняется на всей территории кампуса без учета пульсационной составляющей; с учетом пульсационной составляющей критерий не выполняется в районе главного корпуса.

В целом по МДС можно говорить о том, что условия на территории кампуса благоприятные.

По методике Вайса и Пенвардена, которая изменяется от 0 до 3, большая часть территории находится в зоне 0-2 (без учета пульсационной составляющей) и в 1-3 (с учетом пульсационной составляющей; особенно неблагоприятные зоны располагаются вблизи главного здания университета. В целом ситуация неудовлетворительная.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. В целом по всем нормам и методикам кроме МДС ветровой режим без учета пульсационной составляющей на территории кампуса можно назвать неблагоприятным для пешеходов.
2. Ветровой режим с учетом пульсационной составляющей на территории кампуса можно характеризовать как неблагоприятный, а в окрестности главного здания даже критичным.

Следующим шагом модель кампуса была расширена, была смоделирована окрестность университета. Модель составила примерно 2.6 миллиона узлов и 6.25 миллиона ячеек (2.2 миллиона тетраэдральных, 4 миллиона призматических). Полная расчетная область представляет собой цилиндр радиусом 1693 м и высотой 615 м. Для полученной модели также оценивались результаты пешеходной комфортности по различным методикам и нормам с учетом и без учета пульсационной составляющей, т.к. для предыдущей модели результаты с учетом пульсационной составляющей были более некомфортны, для новой модели проанализируем только результаты с учетом пульсационной составляющей рис. 5.19-5.26.

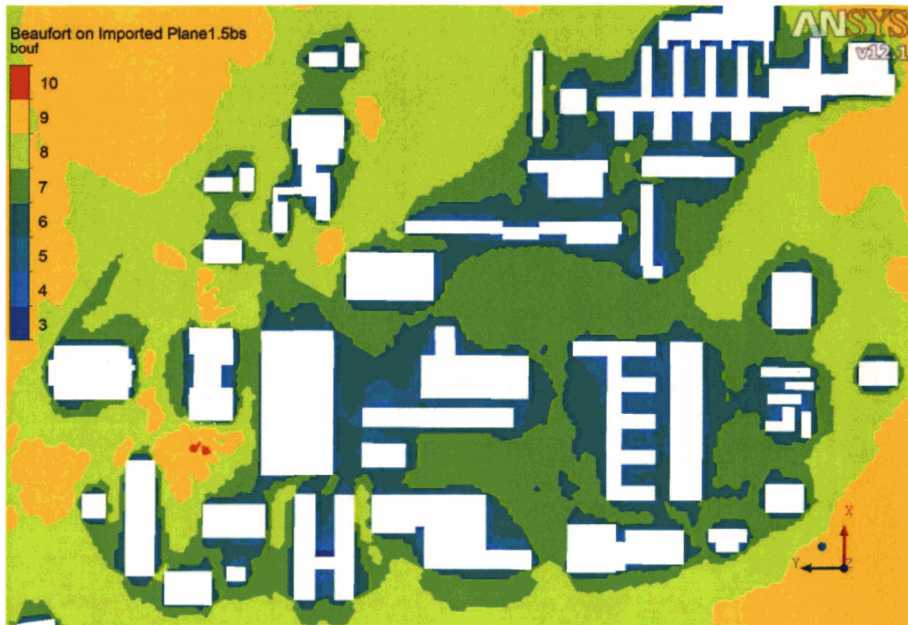


Рисунок 5.19 — Результаты для шкалы Бофорта с учетом пульсационной составляющей для модели с окрестностью.



Рисунок 5.20 — Результаты для Голландских норм с учетом пульсационной составляющей для модели с окрестностью.



Рисунок 5.21 — Результаты для норм RWDI с учетом пульсационной составляющей для модели с окрестностью.

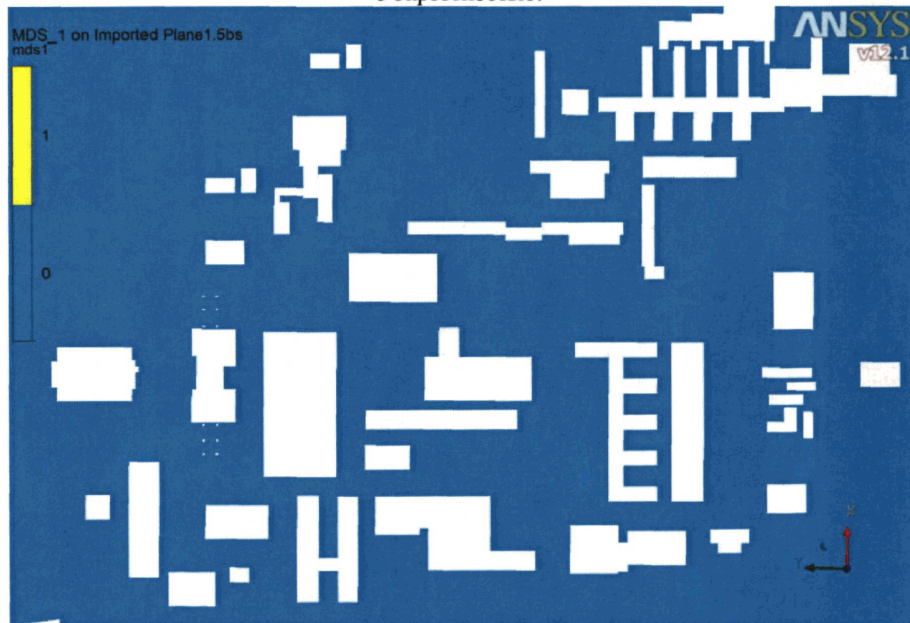


Рисунок 5.22 — Результаты для норм МДС1 критерий с учетом пульсационной составляющей для модели с окрестностью.

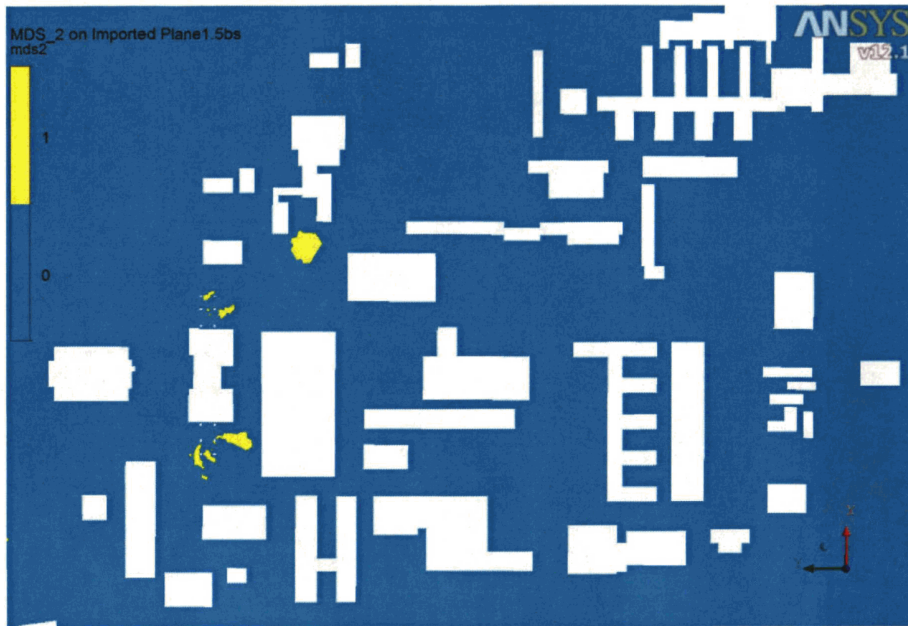


Рисунок 5.23 — Результаты для норм МДС 2 критерий с учетом пульсационной составляющей для модели с окрестностью.

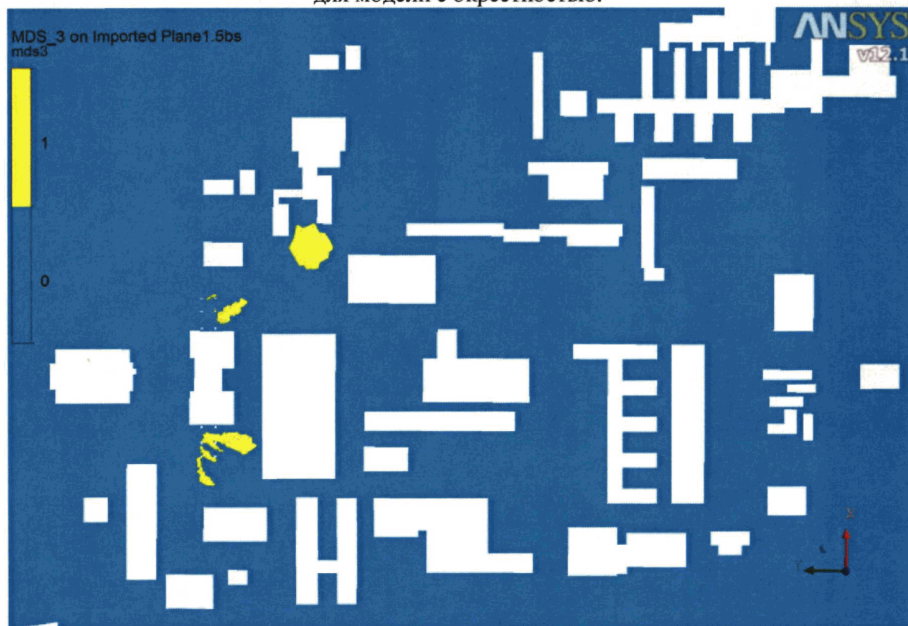


Рисунок 5.24 — Результаты для норм МДС 3 критерий с учетом пульсационной составляющей для модели с окрестностью.

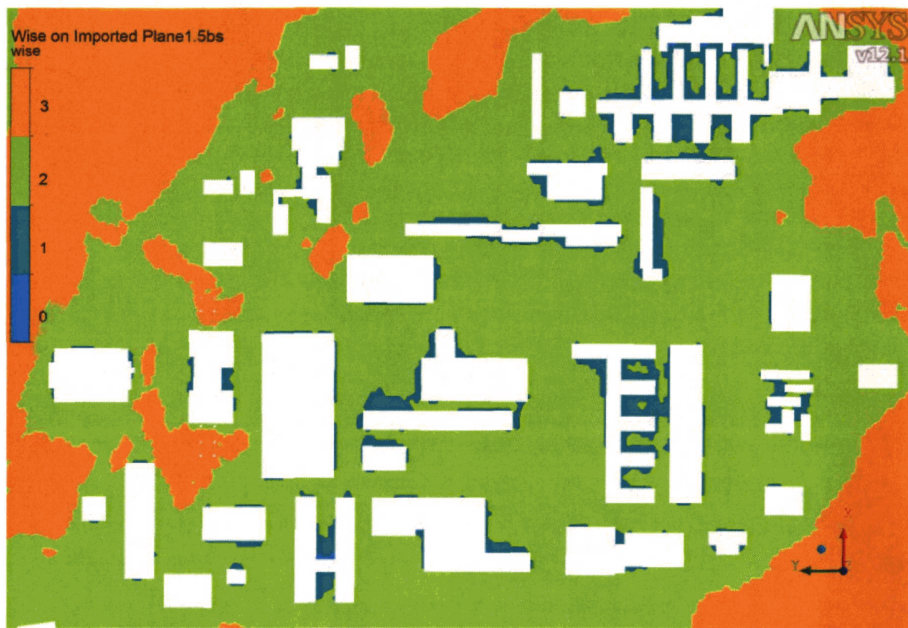


Рисунок 5.25 — Результаты для норм Вайса с учетом пульсационной составляющей для модели с окрестностью.



Рисунок 5.26 — Результаты для разработанной методики относительных скоростей с учетом пульсационной составляющей для модели с окрестностью.

Далее была проведена оценка ощущаемой температуры воздуха при температуре  $4^{\circ}\text{C}$ . Результаты представлены на рисунке 5.27.

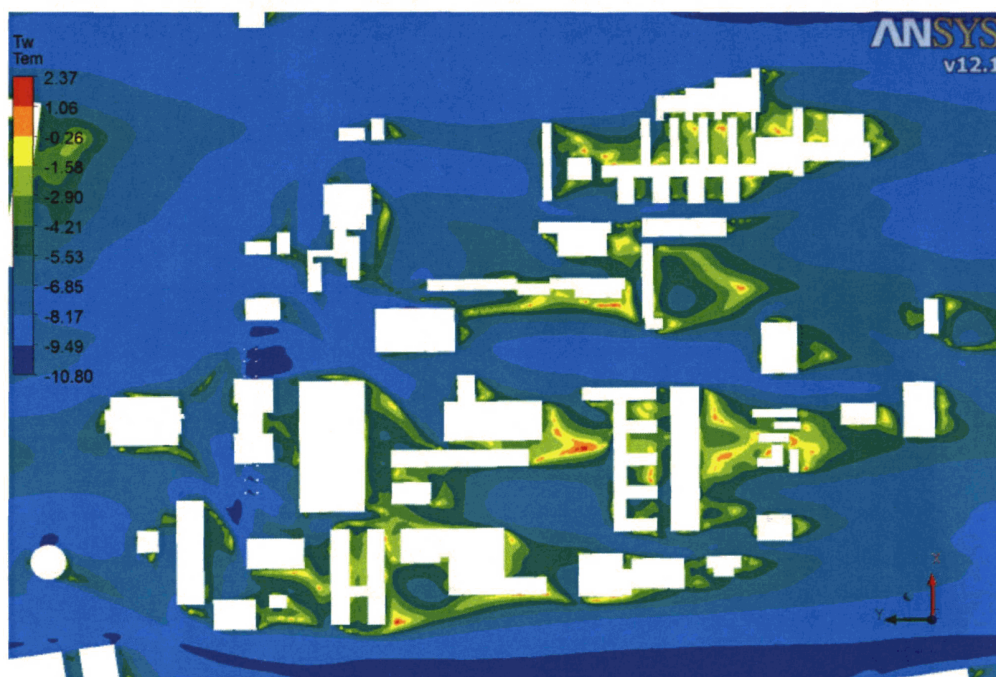


Рисунок 5.27 — «Ощущаемая» температура воздуха в пешеходных зонах кампуса с учетом ветра при температуре воздуха  $-4^{\circ}\text{C}$ .

По результатам для шкалы Бофорта, в новой модели бальность по шкале на территории кампуса составляет 4-7, что можно считать неудовлетворительным, в районе главного корпуса у колонн бальность составляет 8-10, что можно считать критичным. В целом обстановку на территории кампуса университета (с учетом близлежащей территории) по шкале Бофорта с учетом пульсационной составляющей можно охарактеризовать неудовлетворительной.

По результатам для норм Нидерландов (где и расположен комплекс зданий), которые изменяются от 0 до 4, практически на всей территории балл по шкале равен двум, что интерпретируется самими нормами как «хорошо» для быстрой ходьбы, «удовлетворительно» для прогулок и «плохо» для сидения на открытом воздухе.



Нормы для оценки пешеходной комфортности, разработанные Т.В. Лоусоном и используемые в RWDI, соответствующие прогулке пешеходов не выполняются практически на всей территории кампуса.

Рассмотрим результаты оценки по МДС.

Первый критерий (скорость ветра более 6 м/с повторяется не более 1000 часов в год) выполняется на всей территории кампуса.

Второй критерий (скорость ветра более 12 м/с повторяется не более 50 часов в год) выполняется на всей территории кампуса кроме зон у колонн главного корпуса.

Третий критерий (скорость ветра более 20 м/с повторяется не более 5 часов в год) также выполняется на всей территории кампуса кроме зон у колонн главного корпуса.

В целом по МДС можно говорить о том, что условия на территории кампуса благоприятные.

По методике Вайса и Пенвардена, которая изменяется от 0 до 3, большая часть территории находится в зоне 0-2, в районе у колонн балл равен 3. В целом ситуация неудовлетворительная.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. В целом по всем нормам и методикам кроме МДС ветровой режим с учетом пульсационной составляющей на территории кампуса можно назвать неблагоприятным для пешеходов.
2. Ветровой режим с учетом пульсационной составляющей на территории кампуса с учетом прилегающей территории благоприятнее, чем ветровой режим без учета прилегающей территории.
3. Критичными можно назвать зоны у колонн главного здания по всем нормам.

## **5.2. Численное моделирование пешеходной комфортности на территории строящегося торгового комплекса "Пулково аутлет"**

### **Краткая характеристика комплекса "Пулково аутлет".**

Торговый Комплекс «Пулково аутлет» запроектирован на участке 12,6 га, расположенном к югу от Санкт-Петербурга. Территория находится в пределах приаэродромной территории международного аэродрома ФГУАП "Пулково", на пересечении шоссе, ведущего в аэропорт – Пулковского шоссе, которое является основной магистралью для легковых и грузовых потоков, идущих с севера на юг, а также проектируемой трассы "Санкт-Петербург-Москва".

Территория представляет собой ровный участок земли, с северной стороны расположено несколько промышленных и логистических зданий (рисунок 5.28).

Опишем некоторые архитектурно-планировочные решения комплекса, важные с точки зрения ветровой комфортности.

Торговый центр спроектирован в форме треугольника, направленного вершиной в северо-восточном направлении, раскрытой широкой частью торговый центр развернут в сторону пересечения транспортных потоков.

Комплекс «Пулково аутлет» по завершении строительства будет включать 160 магазинов. Каждое отдельное коммерческое подразделение – модульное, с шириной 7,5 метров. Все витрины выходят на пешеходные улицы и площади, вымощенные терракотовой плиткой и камнем. Каждый магазин имеет вход со стороны внутреннего двора для вноса товаров, погрузочно-разгрузочных работ. Эта часть будет доступна через электронные ворота управляемые на расстоянии от диспетчерской, расположенной рядом с главным входом.

Складские помещения общей площадью в 2000 м<sup>2</sup> запроектированы на первом и (в основном) на втором этажах здания и расположены в конце основной пешеходной улицы. Центральная площадь запроектирована на одной оси с главным входом, в стороны расходятся несколько меньших площадей с выставленной уличной мебелью и элементами растительного декора, являясь альтернативными направлениями для движения по другим улицам .

Общая крытая площадь – около 35 000 м<sup>2</sup>.

Комплекс окружен забором высотой 2 м. Торговая улица и внешняя складская зона отделены воротами (рисунок 5.28).

Проектная организация ООО "АЙКОМ". Архитектура разработана HYDEA. Главный архитектор проекта О. Боровикова.



Рисунок 5.28 — Общий вид комплекса по завершении строительства.

#### **Ветровые режимы зоны строительства.**

Климат Санкт-Петербурга умеренный и влажный, переходный от морского к континентальному.

Характеристики зоны строительства по СП 20.13330.2011 и СНиП 2.01.07-85\*: ветровой район – II, нормативное значение ветрового давления  $w_0 = 300$  Па (без учета коэффициента безопасности 1.4).

Предлагается принять тип местности (в районе строительства): А – открытые побережья морей, озер и водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи, тундра.

Роза ветров по различным источникам (Петербург, Кронштадт, аэропорт, близлежащие метеостанции области (рисунки 5.29-5.34) достаточно близка. Господствующее направление ветра- западное и юго-западное.

Распределение ветров по территории Ленинградской области показано на рисунке 5.35. В таблице 5.2 представлена принятая роза ветров для оценки пешеходной комфортности на территории комплекса.



Рисунок 5.29 — На карте GoogleMaps показано местоположение метеостанций в окрестностях Санкт-Петербурга.

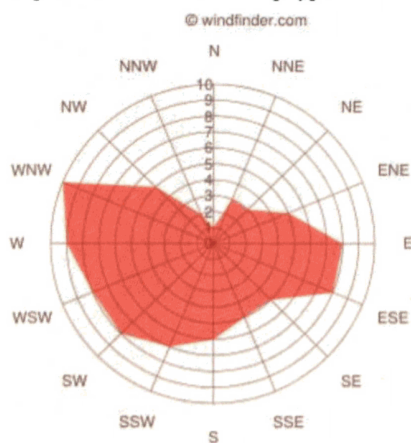


Рисунок 5.30 — Среднегодовая роза ветров по данным метеостанции аэропорта Пулково (см. метку на верхней схеме), построенная по данным сайта windsurfer.ru за 2005-2011 годы

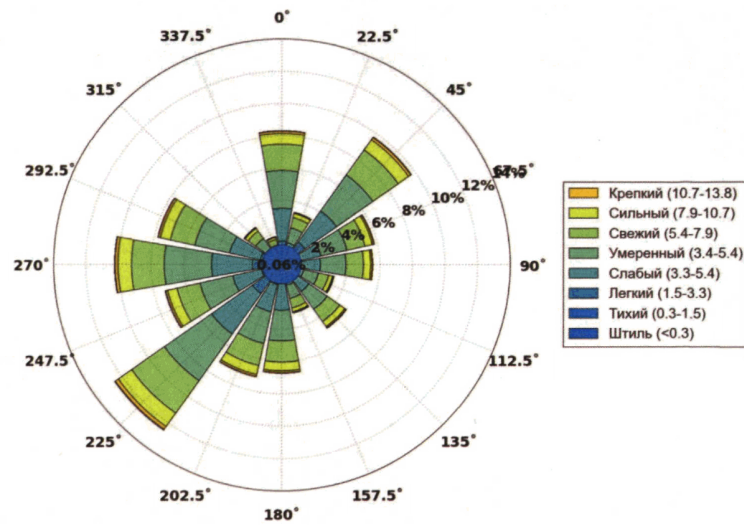


Рисунок 5.31 — Роза ветров Санкт-Петербурга, построенная по данным сайта [meteo.infospace.ru](http://meteo.infospace.ru) за 1998-2011 годы для метеостанции ГГО им.Воейкова.

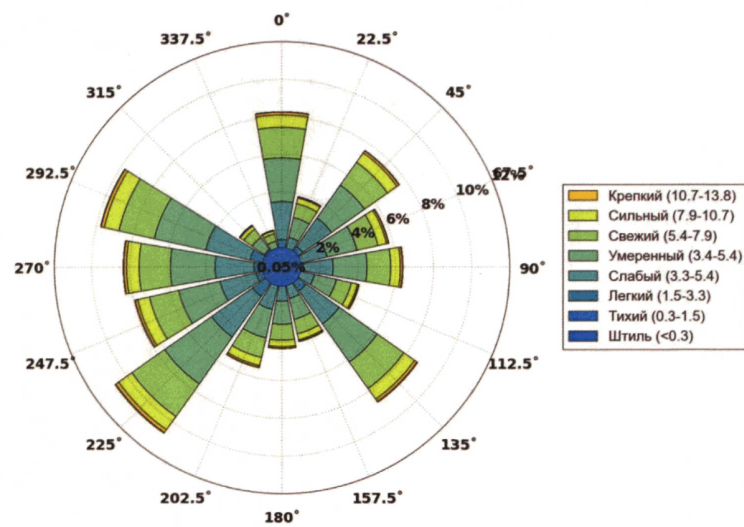


Рисунок 5.32 — Роза ветров, построенная по данным сайта [gr5.ru](http://gr5.ru) за 2005-2011 годы для метеостанции Кронштадт.

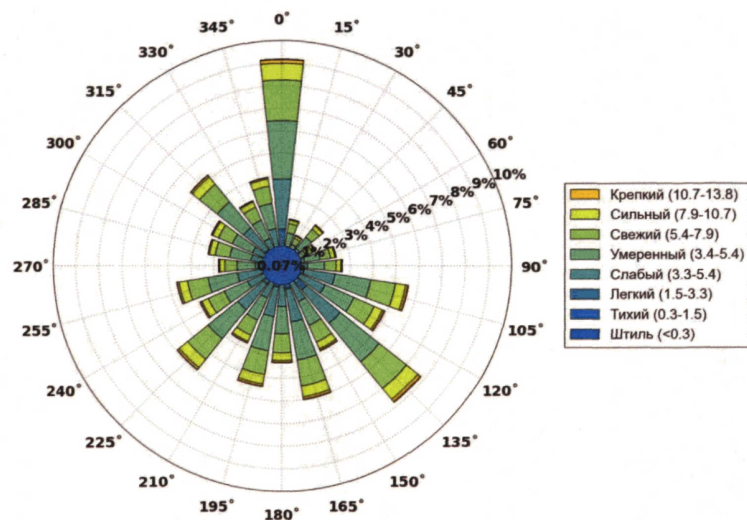


Рисунок 5.33 — Роза ветров, построенная по данным сайта gr5.ru за 2005-2011 годы для метеостанции Кингисепп.

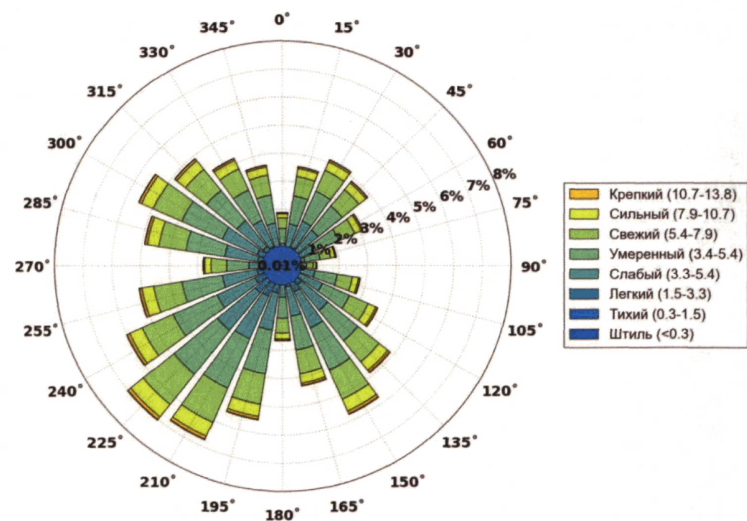


Рисунок 5.34 — Роза ветров, построенная по данным сайта gr5.ru за 2005-2011 годы для метеостанции Кириши.

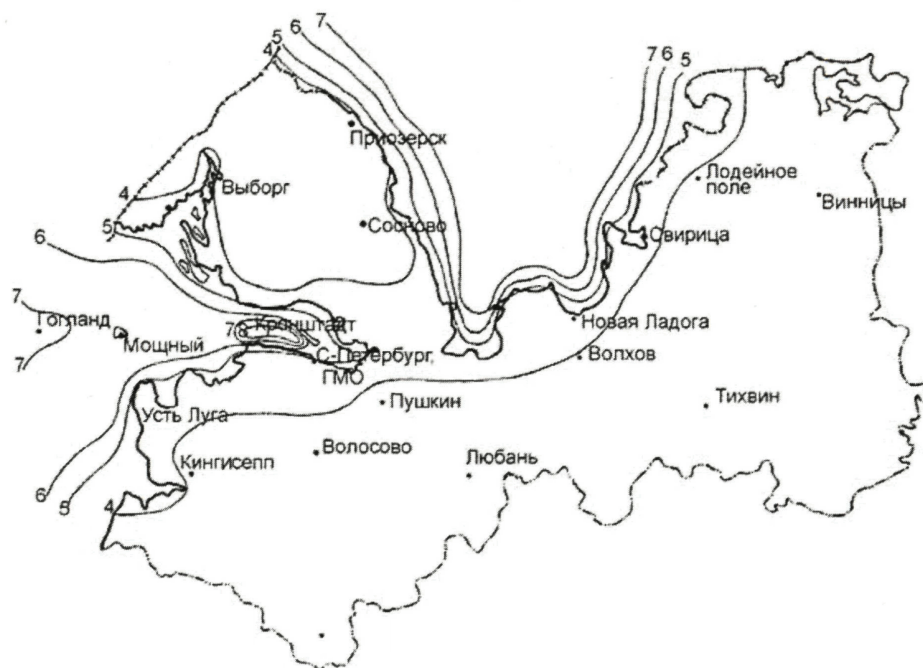


Рисунок 5.35 — Изолинии распределения средних скоростей ветра по территории Ленинградской области в м/с.

Таблица 5.2 Направление и повторяемость ветров на высоте 10 м (часов в год), принятые при расчетах. Отсчет углов от севера к востоку.

Угол	Скорость ветра, м/с								
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18
0°	2	6	8	7	5	3	1	0	0
15°	4	12	16	14	10	5	2	1	0
30°	6	18	24	21	15	8	3	1	0
45°	6	18	24	21	15	8	3	1	0
60°	9	25	32	29	20	11	5	2	0
75°	12	34	44	39	27	15	6	2	1
90°	17	49	64	57	39	21	9	3	1
105°	17	49	64	57	39	21	9	3	1
120°	15	43	56	50	34	19	8	3	1
135°	13	37	48	43	29	16	7	2	1
150°	11	31	40	36	24	13	6	2	1

<b>165<sup>0</sup></b>	12	34	44	39	27	15	6	2	1
<b>180<sup>0</sup></b>	13	37	48	43	29	16	7	2	1
<b>195<sup>0</sup></b>	14	40	52	47	32	17	7	3	1
<b>210<sup>0</sup></b>	15	43	56	50	34	19	8	3	1
<b>225<sup>0</sup></b>	17	49	64	57	39	21	9	3	1
<b>240<sup>0</sup></b>	16	46	60	54	37	20	9	3	1
<b>255<sup>0</sup></b>	17	49	64	57	39	21	9	3	1
<b>270<sup>0</sup></b>	17	49	64	57	39	21	9	3	1
<b>285<sup>0</sup></b>	20	59	76	68	47	25	11	4	1
<b>300<sup>0</sup></b>	18	52	68	61	42	22	10	3	1
<b>315<sup>0</sup></b>	11	31	40	36	24	13	6	2	1
<b>330<sup>0</sup></b>	4	12	16	14	10	5	2	1	0
<b>345<sup>0</sup></b>	2	6	8	7	5	3	1	0	0



### Разработка численной модели

На предварительном этапе были выполнены оценочные расчеты для оценки влияния рельефа и шероховатости местности.

Расчетная сетка в полученной области генерировалась в препроцессоре ANSYS с использованием разработанного параметризуемого макроса. Размерность расчетной CFD-сетки – примерно 2 миллиона ячеек.

В представленную модель могут быть добавлены сам комплекс и основные здания, влияющие на ветровой поток. Необходимая точность моделирования формы определяется их высотой и, следовательно, зоной аэродинамического влияния (10-15 высот). Для строящегося микрорайона Шушары (с 20-этажными зданиями) она составит порядка 1 км.

Лесные массивы и малозначимые объекты учитывались эквивалентными шероховатостями поверхностей (генерирующими аналогичный закон изменения скорости и турбулентности ветра с высотой).

Оценочные расчеты при западном, южном и северном ветре указало на слабую зависимость граничных условий. В окрестности 3 км от площадки перепад высот не превышал 5 м. В этой связи дальнейшие расчеты проводились на плоской модели радиусом 1 км.

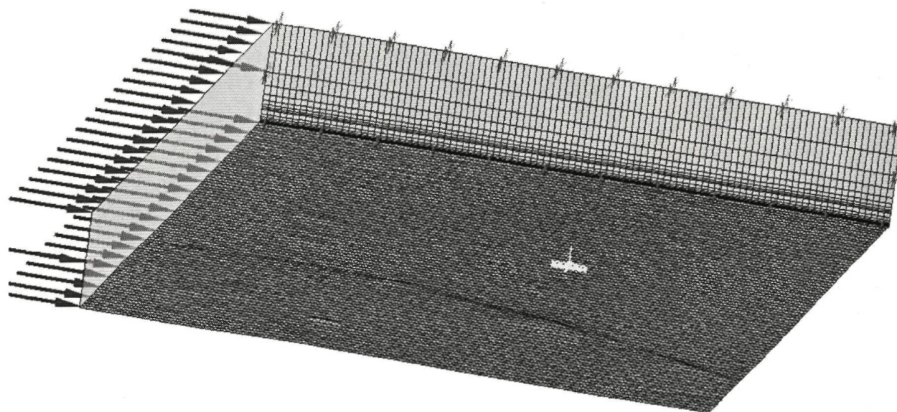


Рисунок 5.36 — Конечно-объемная модель территории(примерно 8×12 км).

Геометрическая модель объекта была подготовлена в AUTOCAD на основе предоставленной заказчиком модели применительно к специфике CFD-моделирования. Шпильки и мелкие детали конструкции были удалены, как не влияющие на пешеходную комфортность и пренебрежимо мало влияющие на нагружение ограждающих конструкций.

Далее была создана модель окружающего воздушного пространства в форме цилиндра. Поверхность земли полагалась плоской.

Расчетная сетка в полученной области генерировалась в препроцессоре ANSYS Workbench с использованием разработанного параметризуемого макроса. Была создана тетраэдральная сетка в цилиндре радиусом 270 м и высотой от 2 м до 25 м. Размер ребер элементов не превышал 2 м на внешних поверхностях и крышах и порядка 0.8 м на уровне высот 2.5-6 м, до высоты 2.5 м - 10 элементов по высоте.

Далее сетка была передана в препроцессор ANSYS/Prep7 для генерации внешней зоны, назначения компонент и т.п. с использованием специально разработанного макроса.

В модели примерно 1.5 миллиона узлов и 4.35 миллиона ячеек (2.6 миллиона тетраэдральных, 1.5 миллиона призматических и 0.2 млн. гексаэдральных ячеек).

Модель оптимизирована применительно к анализу пешеходной комфортности и сгущена в соответствующей приземной области (см. рис).

Зеленые насаждения ("в запас") не учитывались.

Автомобили на парковке (размещение условное), автотрасса, а также логистический комплекс "Кулон-Пулково" моделировались по технологии "immersed solids", позволяющей качественный учет влияния сооружения без существенного усложнения расчетной схемы.

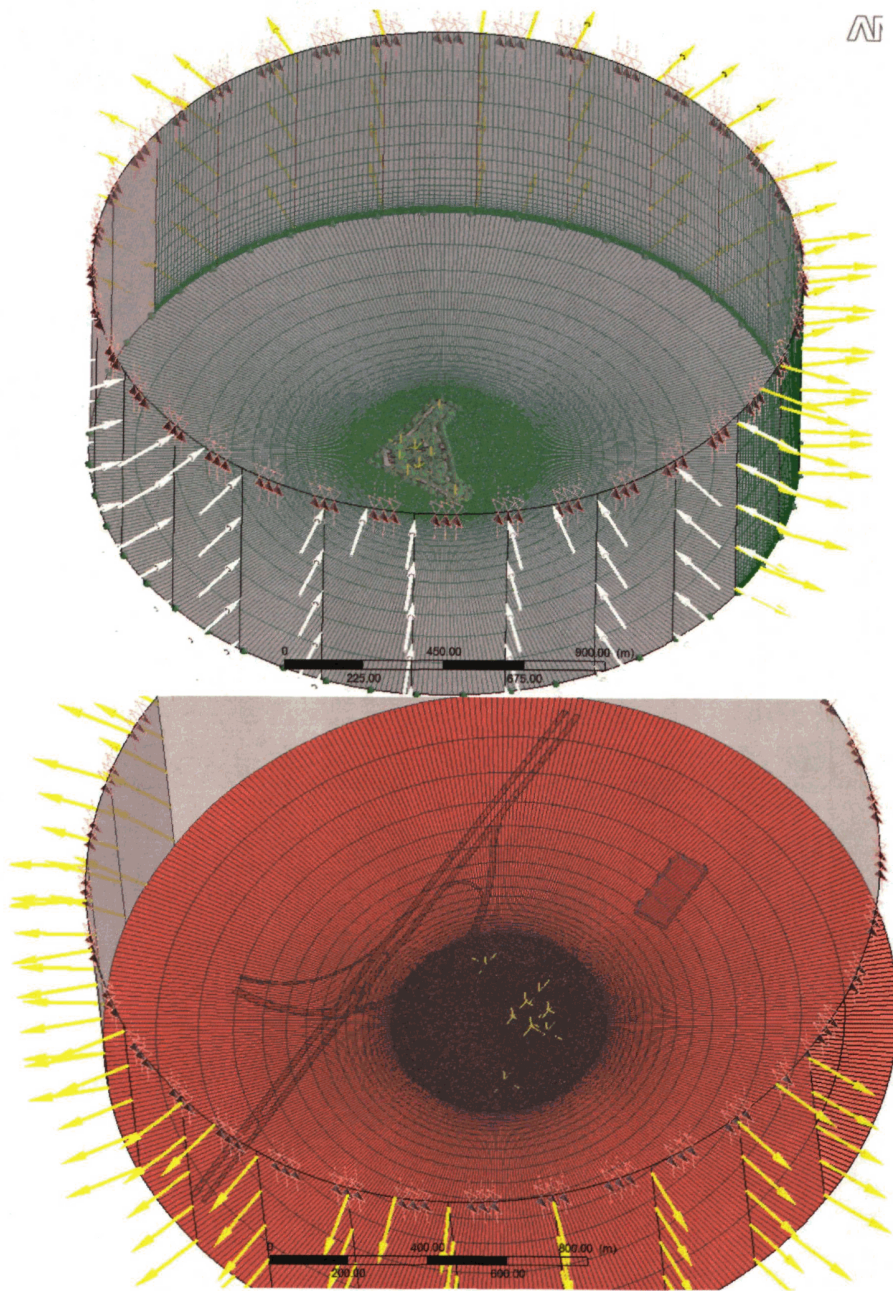


Рисунок 5.37 — Комплекс «Пулково аутлет». Конечно-объемная модель (без учета и с учетом окружающей застройки).

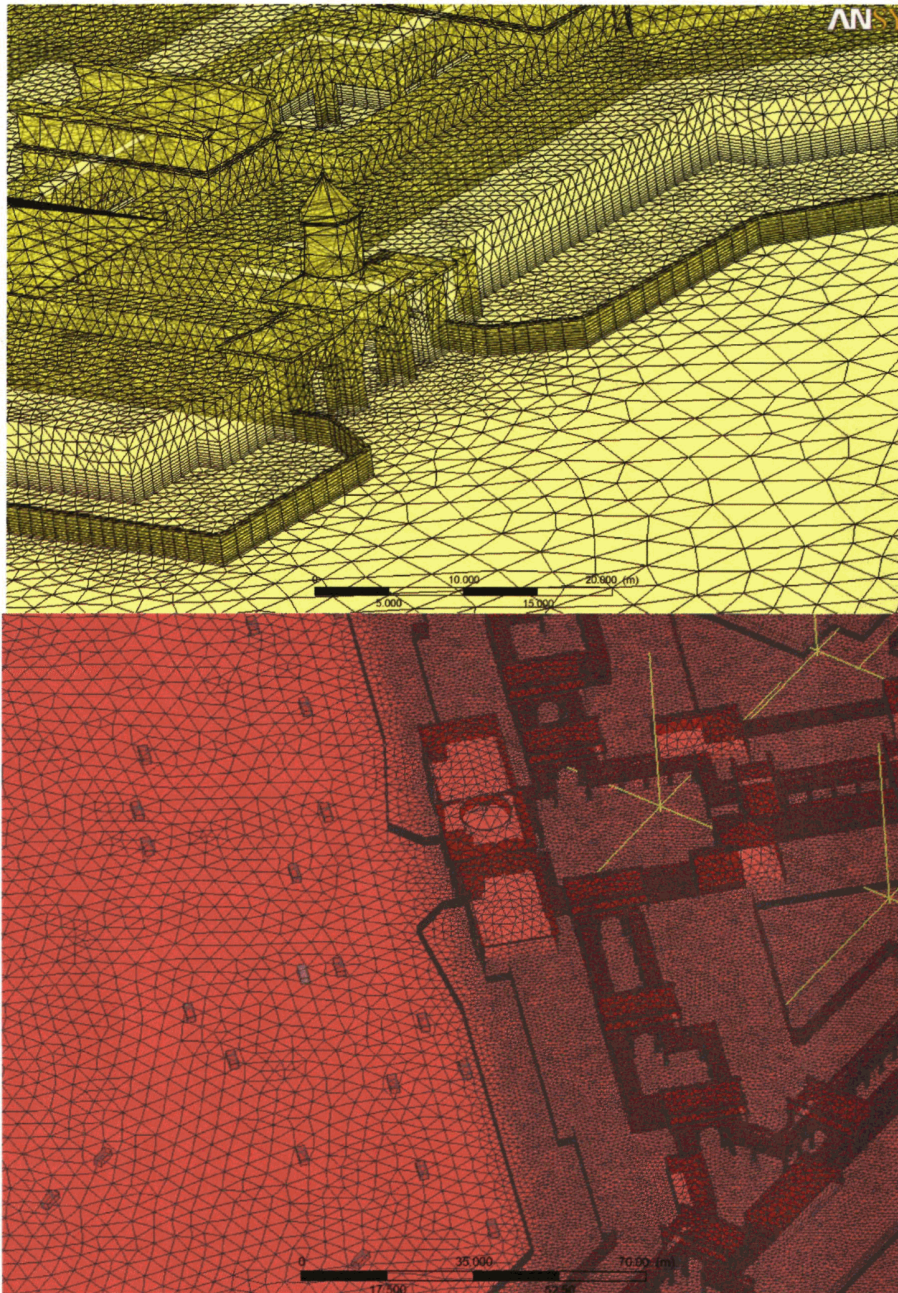


Рисунок 5.38 — Комплекс «Пулково аутлет». Модель (4.4 миллионов ячеек).  
Расчетная сетка на поверхностях зданий

### Начальные и граничные условия

Для области расчета задан тип среды – идеальный газ при температуре 285К и давлении 1 атм.

При подготовке модели в препроцессоре ANSYS всем группам поверхностей (компонентам) были присвоены соответствующие наименования для удобства присвоения в CFX граничных условий. В частности на боковой поверхности создано 24 компонент (участки по 15°).

Для каждого направления ветра выбирается двенадцать компонент для граничного условия типа «вход» (INLET в терминах CFX), для иных восьми – условие, позволяющее потоку как выходить из расчетной области, так и входить в нее (OPENING в терминах CFX). На условии OPENING задано избыточное давление 0 Па. Граничные условия на подходе соответствовали ветровому району II, типу местности "пригород". Данные СНиП по профилям давлений и пульсациям были пересчитаны для ввода в программу ANSYS CFX в аналогичные зависимости от вертикальной координаты для скорости, кинетической энергии турбулентности и энергии диссипации, соответствующие расчетным значениям нагрузок.

На верхней поверхности расчетной области (высота 700 м) задано условие симметрии, обеспечивающее горизонтальность потока.

На нижней поверхности расчетной области и на поверхности сооружения заданы условия непротекания и прилипания "no slip".

Масштаб турбулентности принят равным 100 м в соответствии с рекомендациями Eurocode [57] для открытой местности

Нижней поверхности (поверхности земли) задается условие типа "no slip" с высотой шероховатостей  $h=0.5$  м.

### Параметры расчета

Расчеты проводились с использованием модели турбулентности SST вплоть до достижения всеми неизвестными относительной среднеквадратичной нормы невязок  $10^{-5}$ .

По результатам предварительных расчетов сетка была скорректирована в ряде зон, а также было подобрано значение эквивалентной шкалы "псевдовремени", монотонно ускоряющее сходимость. "Хорошая" сходимость (около 70-80 итераций) позволила сделать вывод о рациональности принятой сетки и параметров итераций.

Были назначены необходимые параметры и переменные для мониторинга в процессе счета и удобства обработки результатов.

Разработан скрипт на языке Python, позволяющий наиболее эффективное распараллеливание и последовательный расчет всех направлений ветра за один сеанс.

Расчеты выполнялись на кластере НОЦ КМ МГСУ.

Количество вычислительных узлов – 25, количество вычислительных ядер – 300. Объем ОЗУ – 600 Гб. Емкость основной СХД – 7,8 Тб.

Для хранения данных используется параллельная файловая система PanFS, интерконнект – QDR Infiniband.

Параметры вычислительного узла: Два процессора IntelXeon с 6 ядрами каждый с тактовой частотой 2,93 ГГц, 24 Гб ОЗУ. Имеется два GPGPU вычислителя Tesla S2050.

#### **Анализ результатов. Оценка пешеходной комфортности.**

Первым этапом для данного объекта был проведен анализ аэродинамической пешеходной по пяти методикам и нормам с помощью применения разработанной программы ( $k=1.5$ ). Результаты работы программы были обработаны в постпроцессоре ANSYS CFX и получены картины выполнения норм, представленные на рисунках 5.39-5.45.

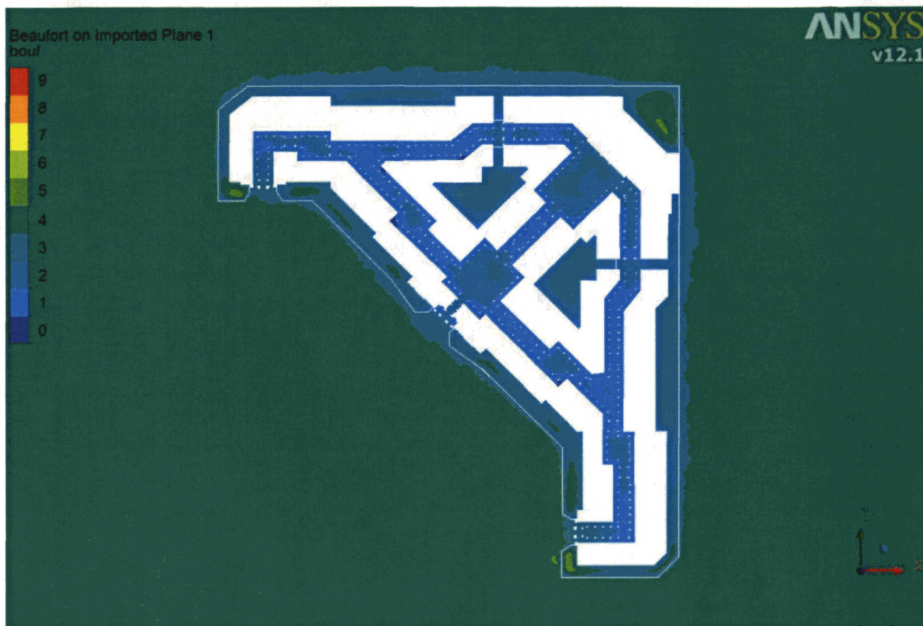


Рисунок 5.39 — Распределение скоростей ветра в пешеходных зонах «Пулково аутлет» по шкале Бофорта.

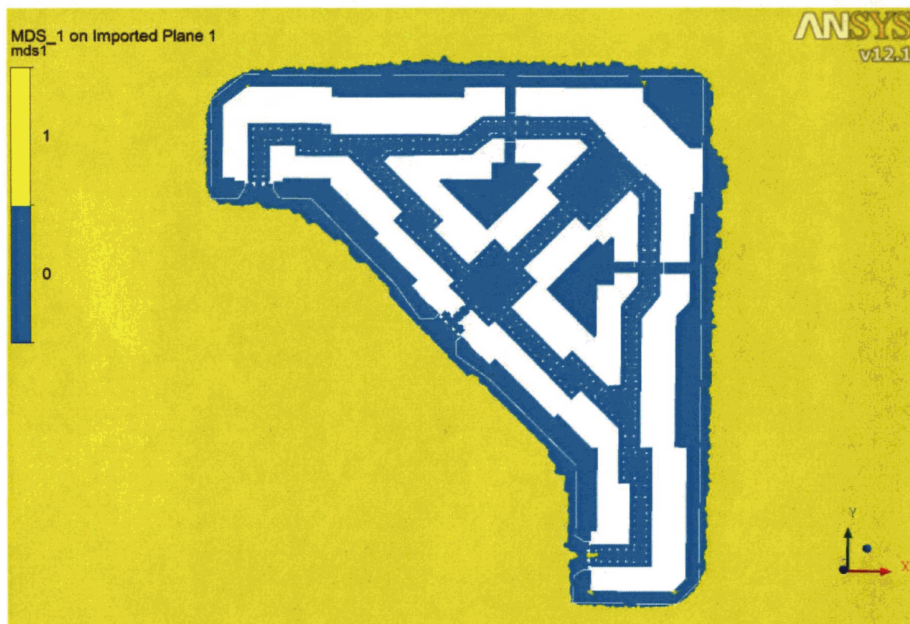


Рисунок 5.40 — Выполнение первого критерия пешеходной комфортности МДС в пешеходных зонах «Пулково аутлет».

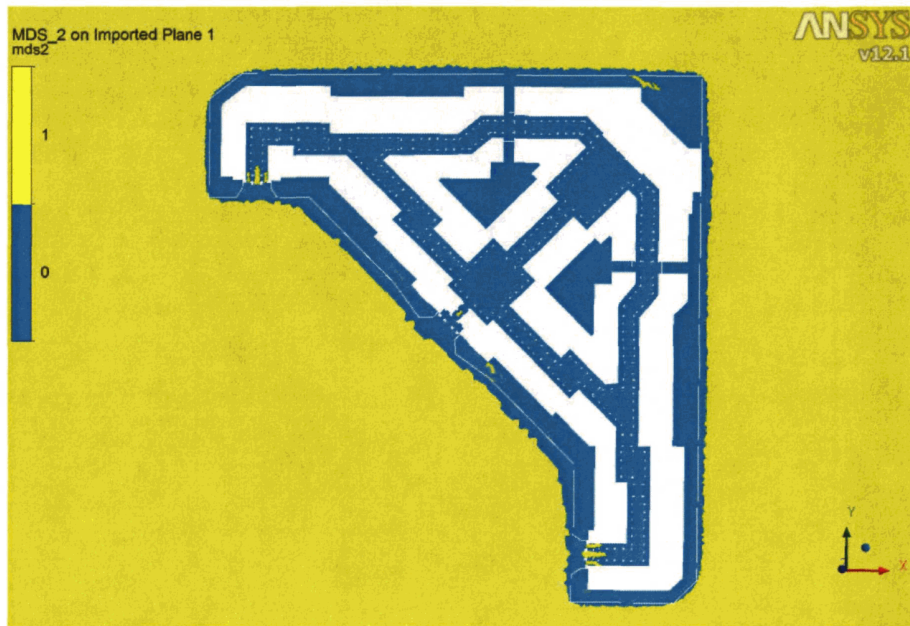


Рисунок 5.41 — Выполнение второго критерия пешеходной комфортности МДС в пешеходных зонах «Пулково аутлет».

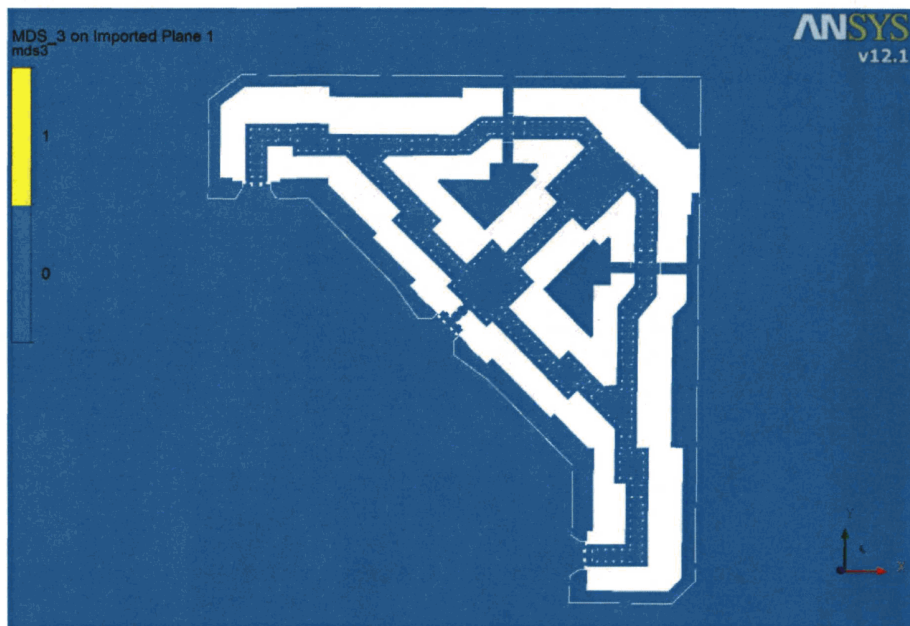


Рисунок 5.42 — Выполнение третьего критерия пешеходной комфортности МДС в пешеходных зонах «Пулково аутлет».





Рисунок 5.43 — Выполнение критериев пешеходной комфортности NEN (Нидерланды) в пешеходных зонах «Пулково аутлет».

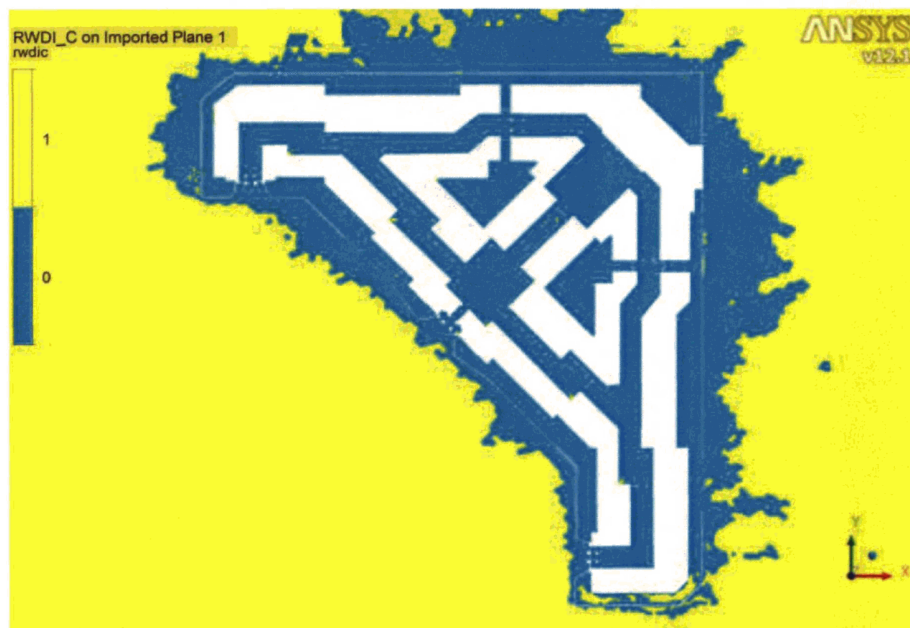


Рисунок 5.44 — Выполнение допустимого критерия D пешеходной комфортности RWDI (США) в пешеходных зонах «Пулково аутлет».

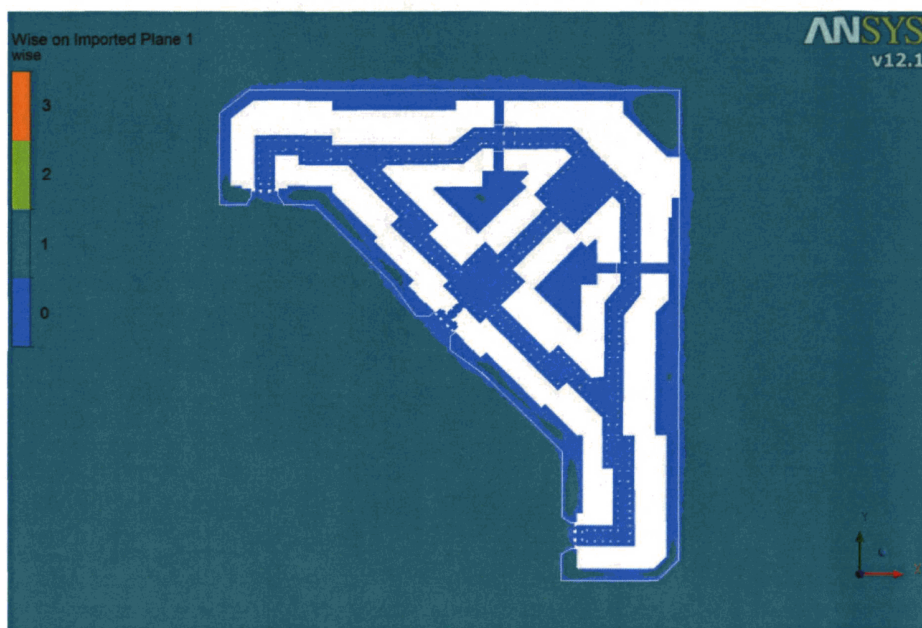


Рисунок 5.45 — Выполнение критериев пешеходной комфортности, разработанных А.Ф.Е Вайсом и А.Д. Пенварденом в пешеходных зонах «Пулково аутлет».

Проанализируем полученные результаты.

По нормам МДС на всей территории торгового комплекса выполняются первый и третий уровень пешеходной комфортности, второй уровень не выполняется на небольших участках во входах (не центральном).

По нормам Нидерландов комфортность меняется от А до D при коэффициенте  $k=1.5$ . Что говорит о том, что в проходах, где достигается критерий D, вероятность превышения скорости ветра 5 м/с составляет более 10%. Такие проходы классифицируются, как места удовлетворительные для быстрой ходьбы.

По методике Лоусона, почти на всей территории, имеем выполнения критерия для прогулки.

По методике Вайса и Пенвардена критерии 1 и 2 на всей территории комплекса, критерий 3 не встречается.

По шкале Бофорта имеем изменение скоростей ветра от 1 до 5.

Максимальная относительная скорость составляет 1.44.

По результатам анализа можно говорить о том, что территория торгового комплекса в целом является комфортной для пешеходов. Ветрозащита обеспечивается наличием заборов и внутренних ворот. Зеленые насаждения в расчетах не учитывались. Их наличие может улучшить ветровую ситуацию в зонах входов в комплекс.

Следующим шагом было проведено исследование влияния температуры воздуха на пешеходную комфортность.

Изучив данные погоды за прошедший год было выявлено, что возникновение обморожения открытых участков кожи у пешеходов на территории торгового комплекса было возможно только в один день 19.12.2012г. при пребывании на улице в течении 30 минут (рисунок 5.46)

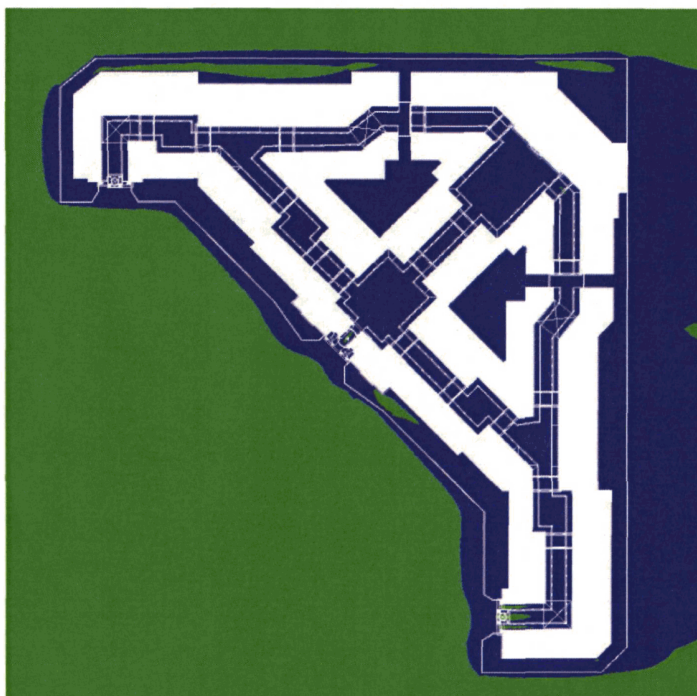


Рисунок 5.46 — Зоны (зеленые) с 5-% вероятностью наступления обморожения открытых участков кожи при пребывании на улице в течении 30 минут (один день за последний год 19.12.2012г.).

### 5.3. Выводы по главе

Разработанная методика и программа оценки скоростей ветра в пешеходных зонах использованы для расчетного определения параметров пешеходной комфортности на территориях кампуса Технического университета г. Эйнховен (Нидерланды) и строящегося торгового комплекса «Пулково аутлет» (Санкт-Петербург):

1. Территория кампуса Технического университета г. Эйнховен (Нидерланды). В целом по всем нормам и методикам (за исключением МДС) ветровой режим с учетом пульсационной составляющей на территории кампуса можно назвать неблагоприятным для пешеходов; ветровой режим с учетом пульсационной составляющей на территории кампуса с учетом прилегающей территории благоприятнее, чем ветровой режим без учета прилегающей территории; критичными, с точки зрения пешеходной комфортности, можно назвать зоны у колонн главного здания по всем нормам.

2. Территория торгового комплекса «Пулково аутлет». По результатам анализа установлено, что территория торгового комплекса в целом является комфортной для пешеходов. Ветрозащита обеспечивается, главным образом, заборами и внутренними воротам.

### Основные результаты и выводы

1. Анализ современных отечественных и зарубежных нормативных документов и методик для пешеходной комфортности в городской застройке показал, что они нуждаются в уточнении и дополнении, особенно в части учета видов деятельности при пребывании на открытых площадках, вероятности возникновения критических скоростей ветра, выбора величин таких скоростей.

2. Разработана методика расчета ветровых воздействий в пешеходных зонах городской застройки на базе численного решения стационарных и нестационарных трехмерных уравнений гидрогазодинамики (Навье-Стокса в приближении Рейнольдса, модели турбулентности RANS) с дискретизацией методом конечных объемов, позволяющая адекватно учитывать важные факторы – направления и профиль ветровых потоков, рельеф местности, окружающую застройку.

3. Разработаны рекомендации для построения расчетных сеток, выбора граничных и начальных условий, моделей турбулентности для решения данного класса задач применительно к выбранному базовому программному комплексу (ANSYS CFD). Для автоматизации процесса применения методики разработана подпрограмма (макрос), реализующая подготовку оптимальной расчетной сетки для задач пешеходной комфортности.

4. Разработана программа, реализующая оценку пешеходной комфортности по различным нормам и методикам. Программа зарегистрирована в Роспатенте (Свидетельство № 2013613169 от 27 марта 2013г).

5. Разработана методика моделирования зеленых насаждений, основанная на их представлении в виде «эквивалентных» пористых подобластей, показавшая адекватность результатов для задач в двумерной постановке, и требующая дальнейших исследований применительно к трехмерным задачам.

6. Проведена верификация разработанной методики численного моделирования задач пешеходной комфортности и ее программной реализации на основе сравнения с результатами физического моделирования в аэродинамических трубах и с натурными замерами.

7. Разработанная методика и программа оценки скоростей ветра в пешеходных зонах использованы для расчетного определения параметров пешеходной комфортности на территориях кампуса Технического университета г. Эйнховен (Нидерланды) и строящегося торгового комплекса «Пулково аутлет» (Санкт-Петербург).

8. Разработанную, верифицированную и апробированную методику можно рекомендовать для использования при выборе архитектурных концепций и обосновании проектных решений городских застроек.

**Список использованной литературы.**

1. Атаманчук, А.В. Исследования воздействия ветрового потока на пакет из трех труб с помощью метода конечных элементов [текст] / А.В. Атаманчук, И.С. Холопов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – №8. – 2005. – с. 1-6.
2. Атаманчук А.В. Ветровые нагрузки на элементы трехгранных башен и пакеты вытяжных труб. Автореферат ... дисс. к.т.н. [текст]// Самара.: СГАСУ, 2005. – 22 с.
3. Ахметов, В.К. Численное моделирование вязких вихревых течений для технических приложений [текст]/ В.К. Ахметов, В.Я. Шкадов // М.: изд-во АСВ. – 2009. – 270 с.
4. Белов, И.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости [текст] / И.А. Белов, С.А. Исаев, В.А. Коробков // Л.: Судостроение. – 1989. –256 с.
5. Белов, И.А. Моделирование турбулентных течений. –Учеб. пособие [текст] / И.А. Белов, С.А. Исаев // СПб.: Изд-во БГТУ. –2001. – 107 с.
6. Белостоцкий, А.М. Численное моделирование задач строительной аэродинамики. Разработка методик и исследования реальных объектов [текст] / А.М. Белостоцкий, С.И. Дубинский, И.Н. Афанасьева // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.– 2010.– Т.6.– № 1-2.– с.67-69.
7. Белоцерковский, О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред [текст] / О.М. Белоцерковский // М.: Физматлит. – 1994. – 448 с.
8. Ван-Дайк, П. Альбом течений жидкости и газа [текст] / П. Ван-Дайк// М.: Мир. – 1986. – 184 с.
9. Варапаев, В.Н. Численное и экспериментальное исследование течений в каналах с проницаемыми стенками и их гидродинамической устойчивости [текст] / В.Н. Варапаев, А.А. Свириденков, В.И. Ягодкин // М., СГА. – 2008. – 351 с.
10. Гарбарук, А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие [текст] / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур. // СПб: Изд-во Политехн. ун-та. – 2012. – 88 с.

11. Гувернюк, С.В. Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на элементы ограждений высотных зданий [текст] / С.В. Гувернюк, В.Г. Гагарин // АВОК. – №8. – 2006. – с. 18-24.
12. Гуляев, А.Н. К созданию универсальной однопараметрической модели для турбулентной вязкости [текст] / А.Н. Гуляев, В.Е. Козлов, А.Н. Секундов // Изв. АН СССР, МЖГ. – № 4. – 1993. – 692с.
13. Дорошенко, А.В. Определение ветровой нагрузки на трехмерные конструкции с помощью моделирования в аэродинамической трубе [текст] / А.В. Дорошенко, С.А. Дорошенко, Г.В. Орехов // Вестник Московского государственного строительного университета. – №7. – 2012. – с. 69-74.
14. Дорошенко, А.В. Программа оценки аэродинамической комфортности в пешеходных зонах [текст] / А.В. Дорошенко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 5. – с.100-103.
15. Дорошенко, А.В. Численное моделирование ветровых потоков вокруг живой изгороди [текст] / А.В. Дорошенко // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – №4. – С.69-74.
16. Дорошенко, С.А. Проведение аэродинамических экспериментов с использованием среды LABVIEW [текст] / С.А. Дорошенко, А.С. Белых, А.В. Дорошенко // Сборник трудов конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LABVIEW и технологии National Instruments» . – Москва, РУДН. – 2009. – с.102-104.
17. Дубинский С.И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы: Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: Дубинский Сергей Иванович. – М., 2010. – 198 с.
18. Дубинский, С.И. Численное моделирование скоростей ветра в реальной застройке на примере района г.Токио [текст] / С.И. Дубинский, А.В. Дорошенко // Приволжский научный журнал. – 2012. – №4. – С.70-75.
19. Информация о критериях пешеходной комфортности, используемых фирмой RWDI. [текст] URL: [http://www.rwdi.com/cms/publications/65/comfort\\_criteria.pdf](http://www.rwdi.com/cms/publications/65/comfort_criteria.pdf).



20. Карман, Т. фон. Аэродинамика. Избранные темы в историческом развитии [текст] / Т. фон. Карман // Ижевск, РХД. – 2201. – 208 с.
21. Колмогоров, А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемых вязких жидкостях при очень больших числах Рейнольдса [текст] / А.Н. Колмогоров // Доклады АН СССР. – 1941.
22. Лифанов, И.К. Моделирование аэрации в городе [текст] / И.К. Лифанов, В.А. Гутников, А.С. Скотченко // М., Диалог-МГУ, 1998. – 134 с.
23. Лицкевич В.К. Жилище и климат / В.К. Лицкевич. // М.: Стройиздат, 1984. – 288 с.
24. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа [текст] / Л.Г. Лойцянский // М.: Наука. – 1987. – 840 с.
25. Мак-Дональд, М. WPF 4.5: Windows Presentation Foundation в .NET 4.5 с примерами на C# 5.0 для профессионалов [текст] / М. Мак-Дональд // «ВИЛЬЯМС» 2013. – 1024 с.
26. МДС 20-1.2006 «Временные рекомендации по назначению нагрузок и воздействий, действующих на многофункциональные высотные здания и комплексы в Москве».
27. Мягков, М.С. Город, архитектура, человек и климат [текст] / М.С. Мягков, Ю.Д. Губернский, Л.И. Конова, В.К. Лицкевич // Под ред. к.т.н. М.С.Мягкова, – М.: «Архитектура-С». – 2007. – 344 с.
28. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [текст] / С. Патанкар // М. :Энергоатомиздат. – 1984.
29. Попов, Н.А. Проведение комплекса работ по статистическому и графическому анализу результатов модельных испытаний в аэродинамической трубе здания, возводимого на участках № 2-3 ММДЦ "Москва-Сити", и прилегающих пешеходных зонах [текст] / Попов Н.А. // Эталон-Проект. Москва. – 2007. – 85 с.
30. Реттер, Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика [текст] / Э.И. Реттер // М.: Стройиздат.– 1984.– 294 с.
31. Реттер, Э.И. Аэродинамика зданий [текст] / Э.И. Реттер, С.И. Стриженов

- //М.: Издательство литературы по строительству. – 1968. – 240 с.
32. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика [текст]/ П. Роуч // Мир. – 1980. – 618 с.
33. Сайт OpenFoam [электронный ресурс] <http://www.openfoam.org/docs/user>.
34. Сайт метеостанции Михельсона [электронный ресурс] URL: <http://meteo.timacad.ru/>
35. Самарский, А.А. Введение в теорию разностных схем [текст] /А.А. Самарский// М. : Наука. – 1971. – 552 с.
36. Седов, Л.И. Механика сплошной среды [текст] / Л.И. Седов // М.: Наука. – 1973. – 536 с.
37. Серебровский, Ф.Л. Аэрация жилой застройки [текст] / Ф.Л. Серебровский //М.: Стройиздат.– 1971.– 112 с.
38. Серебровский, Ф.Л. Аэрация населенных мест [текст] / Ф.Л. Серебровский // М.: Стройиздат.– 1985.– 170 с.
39. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения [текст] / Э. Симиу, Р. Сканлан Р. – Пер. с англ. Б.Е. Маслова, А.В. Швецовоой // Под ред. Б.Е. Маслова. М.: Стройиздат. –1984. – 360 с.
40. СНиП 2.01.07 – 85\*. Нагрузки и воздействия // Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП. – 2001. – 44 с.
41. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей [текст] / К. Флетчер// М.: Мир. – 1991. – 504 с.
42. Флетчер, К. Численные методы на основе метода Галеркина : пер. с англ. [текст] / К. Флетчер// М. : Мир. – 1988. – 352 с.
43. Фрик, П.Г. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций. Перм. гос. техн. ун-т. [текст] / П.Г. Фрик // Пермь. – 1998.
44. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [текст] / Г. Шлихтинг // М. : Наука. – 1974.
45. Шур, М.Л. Расчет шума сложных струй на основе первых принципов [текст] / Шур М.Л., Спаларт Ф.Р., Стрелец М.Х. // Математическое моделирование. – 2007. – т. 27, № 7. – с. 5-26.

46. Ansys UK Training Guide. – 2012.
47. Ansys CFX-Solver Theory Guide. – 2012.
48. Blocken, B. CFD simulation of atmospheric boundary layer-wall function problems /B. Blocken, T. Stathopoulos, J. Carmeliet // Atmospheric Environment. – vol. 41 (2) . – 2007. – p.238-252.
49. Bottema, M. Wind climate and urban geometry/ M. Bottema //Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven. – 1993. – 223 p.
50. Chung, T.J. Computational Fluid Dynamics/ T.J. Chung // Cambridge University Press. – 2002. –1012p.
51. Criteria for wind comfort according to the Dutch wind nuisance standard NEN 8100 (2006) (NEN, 2006. Wind comfort and wind danger in the built environment. NEN 8100. Dutch Standard).
52. Davenport, A.G. Gust loading factors / A.G. Davenport // Proc. of American soc. of civil Engineering. – Vol. 93 (1) . – №. ST3. – 1967.
53. Davenport, A.G. The application of statistical concepts to the wind loading of structures / A.G. Davenport // Proc. Civ. Engineers. – Vol. 19. – 1961. – P. 449–472.
54. Davidson, L. An introduction to turbulence models, Department of Thermo and Fluid Dynamics / L. Davidson// Chalmer University of Technology, Publication 97/2, Sweden. – 2003. – p. 1-8.
55. Durao, D.F.G., Heitor, M.V., and Pereira, J.F. The turbulent flow in the near-wake of a squared obstacle. // Proceedings of 1987 ASME Applied Mechanics, Bio-Engineering and Fluids Engineering Conference, Cincinnati, Ohio. – 1987. p. 45-50.
56. Durgin, F.H. Pedestrian wind levels: a brief review / F.H. Durgin, A.W. Chock // Journal of the Structural Division ASCE. – 1982. – P. 1751-1767.
57. Eurocode 1: Actions on structures. – General actions. – Part 1-4: Wind actions pr EN 1991-1-4:2004. – 148 p.
58. Fanger, P.O. Thermal comfort / P.O. Fanger // Danish Technical press, Copenhagen. – 1972. – 245 p.
59. Fanger, P.O Air turbulence and sensation of draught / P.O. Fanger, A.K. Mehikov, H. Hanzaws, J. Ring // Energy and Buildings – 1988. – P. 21-39.

60. FCM-R19-2003 Report on Wind Chill Temperature and Extreme Heat Indices: Evaluation and Improvement Projects// U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE/ National Oceanic and Atmospheric Administration. – 2003. – 75 p.
61. Ferziger, J. Computational Methods for Fluid Dynamics / J. Ferziger, M. Peric // Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1999. p. 1-8
62. Gandemer, J. Wind Environment Around Buildings: Aerodynamic Concepts / J. Gandemer //Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, London, Cambridge Univ. Press. – 1975. – P. 423-432.
63. Franke J., Hellsten F., Schlunzen H. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment, quality assurance and improvement of microscale meteorological models. – 2007.
64. Franke, J. Recommendations on the use of CFD in wind engineering. Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics / J. Franke, C. Hirsch, A.G. Jensen, H.W. Krüs, M. Schatzmann, P.S. Westbury, S.D. Miles, J.A. Wisse, N.G. Wright // 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. – p.52.
65. Geurts, B.J. Wind-induced pressure fluctuations on building facades / B.J. Geurts// Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven. – 1997. – 268 p.
66. Geurts, B.J. Proposal for a new COST Action Large-Eddy Simulation for Advanced Industrial Design (LES-AID) Mathematical Fluid DynamicsFaculty EEMCS. /B.J. Geurts // University of Twente, The Netherlands. – 2008.
67. Hunt, J.C.R. The Effects of Wind on People: New Criteria Based on Wind Tunnel Experiments/ J.C.R. Hunt, E.C. Poulton, J.C. Mumford // Build. Environ. – 1976. – P. 15-28.
68. Isyumov, N. The Ground Level Wind Environment in Built-up Areas / N. Isyumov, A.G. Davenport // Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, London, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K. – 1976. – P. 403-422.
69. Jackson, P.S. The evaluation of windy environments / P.S. Jackson // Building and

environment. – 1978. – V.13. – P. 251-260.

72. Kareem, A. Pressure fluctuations on a square building model in boundary layer flows / A. Kareem, J.E. Cermak // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 1984. – Vol. 16. – P. 17-41.

73. Launder, B.E. The numerical computation of turbulent flow/ B.E. Launder, D.B. Spalding // *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.* – 1974. – Vol. 3. – №2. – p. 269-289.

74. Lawson, T.V. The effects of wind on people in the vicinity of buildings / T.V. Lawson, A.D. Penwarden // *Proceedings 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, Cambridge University Press. – 1975. – P. 605-622.

75. Meissner, C. Getting started with WindSim 5 / C. Meissner // *WindSim AS*. – 2010. – 80 p.

76. Melbourne, W.N. Problems of wind flow at the base of tall buildings / W.N. Melbourne, P.N. Joubert // *Proc. 3rd Int. Conf. on Build. and Struct.* Tokyo. – 1971. – P. 105-114.

77. Menter, F.R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model / F.R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry // *Turbulence: Heat and Mass Transfer 4: Proc. Intern. Conf.* Begell House, Inc. 2003. – 8 p.

78. Menter, F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications / F.R. Menter// *AIAA Journal*. – 1994. – vol. 32(8) . – P. 1598-1605.

79. Menter, F.R. A Scale-Adaptive Simulation Model using Two-Equation Models / F.R. Menter, Y. Egorov, // *AIAA Paper*, AIAA. – 2005. – P.1093-1095.

80. Menter, F.R. Development and application of a zonal DES turbulence model for CFX-5 / F.R. Menter, M. Kuntz// *ANSYS CFX Validation Report*. – 2001. – Vol.CFX-VAL17/0703. – P.1-34.

81. Mochida, A. Optimization of Tree Canopy Model for CFD Prediction of Wind Environment at Pedestrian Level/ A. Mochida, Y. Tabata, T.Iwata, H. Yoshino// *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – V.96. – Issues 10-11. – October-November 2008. – P.1667-1677.

82. Murakami, S. Wind tunnel modeling applied to pedestrian comfort, / S. Murakami// *Reinhold*. – 1982. – P. 486-503.

83. Murakami, S. Wind effects on pedestrians: New criteria based on outdoor observation of over 2000 persons / S. Murakami, K. Uehara, K. Deguchi // *Cermak*. – 1980. – P. 277-288.
84. Penwarden, A.D. Acceptable wind speeds in towns / A.D. Penwarden // *Build. Sci.* 8. – 1973. – P. 259-267.
85. Penwarden, A.D. Measurements of wind drag on people standing in a wind tunnel / A.D. Penwarden, P.F. Grigg, R. Raymaent // *Building and environment*. – 1978. – V.13. – P.75-84.
86. Penwarden, A.D. Wind Environment Around Building / A.D. Penwarden, A.F.E.Wise // *Building Research Establishment Report, Department of the Environment, London*. – 1975.
87. Popov, N.A. Pedestrian Wind Comfort Study for Moscow International Business Center / N.A. Popov, V.I. Travush, M.A. Berezin // *IV Symposium Environmental Effects on Buildings and People - Actions, influences, interactions, discomfort*. Susiec, Poland. – 2004.
88. Poulton, E.C. The Mechanical Disturbance Produced by Steady and Gusty Winds of Moderate Strength Skilled Performance and Semantic Assessments/ E.C. Poulton, J.C.R. Hunt, J.C. Mumford // *Ergonomics*. – V.18, 6. – 1975. – P. 651-673.
89. *Proceedings of the 2nd International Conference Wind Effects on Trees*, Albert-Ludwigs-University of Freiburg, Germany. – October 2009. – 339 pp.
90. Shirasawa, T. Development of CFD method for predicting wind environment around a high-rise building Part2 : The cross comparison of CFD results using various k- models for the flowfield around a building model with 4:4:1 shape/ T. Shirasawa, T. Tominaga, R. Yoshie, A. Mochida, H. Yoshino, H. Kataoka, T. Nozu, // *AIJ Journal of Technology and Design*. – 2003. – №.18. – P.169-174.
91. Spalart, P.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows / P.R. Spalart, S.R. Allmaras // *La Recherche Aerospaciale*. – 1994. – Vol.1. – p. 5-21.
92. STAR-CD. Руководство пользователя. Версия 3.26. // 2007.
93. Strelec, M. Detached eddy simulation of massively separated flows/ M. Strelec // *AIAA Paper*. – 2001. – №. 2001-0879. – 18 p.

94. Tamura, Y. - Wind Tunnel Tests and Full-scale Measurements. Lecture 7. // Tokyo Polytechnic University, Atsugi, Japan. – 2008.
95. Tominaga, Y. Cross Comparisons of CFD Prediction for Wind Environment at Pedestrian Level around Buildings. Comparison of Results for Flowfield around Building Complex in Actual Urban Area / Y. Tominaga, R. Yoshie, A. Mochida, H. Kataoka, K. Harimoto, T. Nozu // The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE-VI) Seoul, Korea, September 12-14. – 2005.
96. Tominaga, Y. Cross Comparisons of CFD Results of Wind Environment at Pedestrian Level around a high-rise Building and within a Building Complex/ Y. Tominaga, A. Mochida, T. Shirasawa, R. Yoshie, H. Kataoka, K. Harimoto, T. Nozu // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. – 2004. – P.63-70.
97. Tominaga, Y. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings /Y. Tominaga, A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T. Nozu, M. Yoshikawa, T. Shirasawa// Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96. – 2008. – P. 1749-1761.
98. VirtualWind 1.0. User Manual. // RWDI Group. 2010.
99. Wilcox, D.C. Simulation of Transition with a Two-Equation Turbulence Model/ D.C. Wilcox // AIAA J. 32. – 1994. – P. 247–254.
100. Wilcox, D.C. Turbulence modeling for CFD /D.C. Wilcox // 3rd edition, DCW Industries, Inc., La Canada CA. – 2006. – 477 p.
101. Wise, A.F.E. Wind effects due to groups of buildings / A.F.E. Wise // Proceedings of the Royal Society Symposium Architectural Aerodynamics, London. – 26-27 February. – 1970.
102. Yakhot, V. Renormalization group analysis of turbulence / V. Yakhot, S.A. Orszag // Journal of Scientific Computing - 1. 1986. p. 3-51.
103. Yoshie, R. Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan. / R. Yoshie, A. Mochida, Y. Tominaga, , H. Kataoka, K. Harimoto, T. Nozu, T. Shirasawa // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – Volume 95. – Issues 9-11. – October 2007. – P.1551-1578.





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2013613169****Программа критериальной оценки аэродинамической  
комфортности в пешеходных зонах**

Правообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего профессионального  
образования «Московский государственный  
строительный университет» (RU)*

Автор(ы): *Дорошенко Анна Валерьевна (RU),  
Дубинский Сергей Иванович (RU)*

Заявка № **2013611022**Дата поступления **15 февраля 2013 г.**Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ  
**27 марта 2013 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

**Б.П. Симонов**