

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Архитектурно-строительный институт
Строительные конструкции и сооружения

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

Профессор кафедры СПТС,

д.т.н., доцент А.Н. Потапов

_____ 2019 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, к.т.н.

доцент

_____ М.В. Мишнев

_____ 2019 г.

**Тема: Специфика и особенности учета ветрового режима при проектировании
городской застройки**

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К КВАЛИФИКАЦИОННОЙ НАУЧНОЙ РАБОТЕ МАГИСТРА
ЮУрГУ – 08.04.01.2019.076. ПЗ КНР

Руководитель НИР

Профессор кафедры ГИСС, к.т.н.,

доцент

_____ В.Д. Оленьков

_____ 2019 г.

Автор КНР

студент группы АС-259

_____ Н.Т. Тазеев

_____ 2019г.

Нормоконтролер

Профессор кафедры ГИСС, к.т.н.,

доцент

_____ В.Д. Оленьков

_____ 2019 г.

Челябинск 2019

Утверждаю

Директор АС института Ульрих Д.В.

ПРОГРАММА

Научно-исследовательской выпускной квалификационной работы на тему:
Специфика и особенности учета ветрового режима при проектировании
городской застройки

Цель работы: Изучение закономерностей распределения ветрового давления по фасаду высотного здания от действия ветрового потока, трансформированного прилегающей застройкой.

Задачи:

- Выявление прямой зависимости распределения давлений по поверхности здания при действии трансформированного воздушного потока от геометрических параметров застройки.
- Определение оптимальных геометрических параметров застройки, при которых будет минимизирован эффект локального увеличения скорости ветра.
- Разработка предложений и рекомендаций по проектированию застройки с учетом влияния ее геометрических параметров на скоростной режим ветра.

Исходные данные:

- Материалы литературных источников по исследуемой проблематике.
- Материалы нормативно-правовой базы и методические материалы.

Методы исследования:

- Численное моделирование аэродинамических процессов в программном комплексе ANSYS Fluent.
- Статистический анализ результатов.

Ожидаемые результаты:

Составить общую методику учета локальных изменений скорости ветра в городской застройке при расчетах ветровых нагрузок.

Зав. каф. СКИС, к.т.н.

Мишнев М.В.

Руководитель НИР:
к.т.н., проф. каф. ГИСС

Оленьков В.Д.

Исполнитель:
Ст. гр. АС-259

Тазеев Н.Т.

РЕФЕРАТ

Тазеев Н.Т. Особенности и специфика учета ветрового режима при проектировании городской застройки. – Челябинск: ЮУрГУ, АС-259, 2019. – 72 с., 44 ил., 28 табл., библиогр. список – 25 наим., 1 прил.

Объектом исследования является ветровой режим городской застройки как фактор, который необходимо учитывать при расчетах ветровой нагрузки.

Цель работы – разработка методики учета локальных изменений скорости ветра в городской застройке при расчетах ветровой нагрузки.

В процессе исследования проводились эксперименты численного моделирования процесса обтекания воздушным потоком зданий в программном комплексе Ansys Fluent.

В результате исследования были получены данные о значениях скоростей и характере распределения воздушного потока в застройке, разработана общая методика учета локальных увеличений скорости ветра при расчетах ветровой нагрузки на здание.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком уровне влияния трансформированного воздушного потока на здание.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ УЧЕТА ВЕТРОВОГО РЕЖИМА ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ И РАСЧЕТА ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК...7	
1.1. Анализ современного состояния проблемы учета ветрового режима городских территорий.....	7
1.2. Анализ современного состояния проблемы расчета ветровых нагрузок с учетом локальных изменений скорости ветра.....	10
1.3. Основные положения и принципы аэродинамики плохобтекаемых тел....	16
1.4. Существующие способы проведения исследований аэродинамических процессов.....	18
ГЛАВА 2. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	21
2.1. Описание методики проведения исследования.....	21
2.2. Проведение численных экспериментов I-го этапа исследования.....	33
2.3. Анализ результатов численных экспериментов I-го этапа исследования...40	
2.4. Проведение численных экспериментов II-го этапа исследования.....	57
2.5. Сравнение результатов расчета ветровых нагрузок.....	61
2.6. Выводы по результатам исследования.....	63
ГЛАВА 3. Общие выводы и рекомендации.....	64
3.1. Общие выводы по результатам исследования.....	64
3.2. Рекомендации по использованию разработанной методики учета локальных изменений скорости ветра при расчете ветровых нагрузок.....	66
3.3. Перспективы дальнейших исследований проблемы.....	67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	68
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	69
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Список публикаций автора.....	72

ВВЕДЕНИЕ

Цель исследования. Изучение закономерностей распределения ветрового давления по фасаду высотного здания от действия ветрового потока, трансформированного прилегающей застройкой.

Задачи исследования:

1. Выявление прямой зависимости распределения давлений по поверхности здания при действии трансформированного воздушного потока от геометрических параметров застройки на основе результатов экспериментов численного моделирования в программном комплексе ANSYS Fluent.
2. Определение оптимальных геометрических параметров застройки, при которых будет минимизирован эффект локального увеличения скорости ветра, а также будет наблюдаться снижение интенсивности ветрового давления, действующего на высотное здание.
3. Разработка предложений и рекомендаций по проектированию застройки с учетом влияния ее геометрических параметров на скоростной режим ветра.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты исследования могут применяться при проектировании застройки с высотными (более 75 м) зданиями для снижения, действующего на них ветрового давления и нейтрализации эффекта локального увеличения скорости ветра (эффект трубы). При этом учитываются параметры комфортности застройки для человека (режим проветривания).

Современное строительство характеризуется увеличением этажности зданий в рамках тенденции уплотнения застройки и рационального использования территорий. При проектировании высотных (более 75 м) зданий значительное влияние оказывают горизонтальные нагрузки (ветровое давление, сейсмика), для расчета которых существует множество различных методик и рекомендаций.

Но при этом, вопросы расчета высотных зданий на ветровую нагрузку нельзя считать окончательно решенными. Существует целый спектр проблем, возникающих в сложных градостроительных ситуациях (восходящие потоки ветра, определение аэродинамических коэффициентов для зданий сложной формы, влияние параметров застройки на скорость ветра и т.д.). Как известно, для плотной застройки характерно снижение скорости ветра по сравнению с открытой местностью приблизительно в 2 раза, что позволяет снизить расчетную ветровую нагрузку при расчетах. Однако в некоторых неблагоприятных случаях может возникнуть «эффект трубы», при котором при прохождении ветра через застройку, наблюдается увеличение скорости отдельных потоков, оказывающих значительное воздействие на здания. На сегодняшний день этот вопрос учитывается при помощи экспериментов физического и численного моделирования процесса взаимодействия ветра с застройкой во всех направлениях. Эти мероприятия проводят при проектировании кварталов с высотной застройкой (более 100 м), однако это не всегда удобно, а также увеличивает стоимость проектных работ.

В данном контексте возникает необходимость составления уточненных рекомендаций по проектированию, в которых будет учтено влияние трансформации воздушного потока на аэродинамические коэффициенты не только по высоте, но и по всей поверхности здания.

Таким образом, можно судить о том, что тема исследования актуальна и востребована в современном строительстве.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ УЧЕТА ВЕТРОВОГО РЕЖИМА ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ И РАСЧЕТА ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК

1.1. Анализ современного состояния проблемы учета ветрового режима городских территорий

С ростом уровня урбанизации и глобализации все выше возрастает значимость учета ветрового режима при градостроительном проектировании на всех этапах, начиная с генерального плана города, заканчивая проектом детальной планировки его отдельных элементов – кварталов и микрорайонов. Это связано с уплотнением застройки и общим ростом этажности зданий, вследствие чего нарушается процесс естественного проветривания территории.

Учет ветрового режима городской застройки заключается в поиске эффективных планировочных решений при размещении зданий относительно друг друга и выборе оптимальных геометрических параметров зданий и застройки в целом для обеспечения ряда необходимых условий [1]:

- обеспечение естественного проветривания;
- защита от загрязнений воздуха (пыль, выхлопные газы);
- защита от повышенных скоростей ветра;
- защита от шума.

Учет ветрового режима, необходимый, для проектирования непосредственно застройки должен проводиться на стадиях разработки генерального плана города, проекта планировки территории и при составлении градостроительного плана земельного участка. В ЮУрГУ разработана методика учета ветрового режима при градостроительном проектировании на различных стадиях при помощи построения карт аэрационного режима местности или застройки. Такие карты позволяют оценить ветровой режим и учесть его особенности для обеспечения благоприятных экологических условий проживания населения. Пример такой карты для г. Челябинска приведен на рисунке 1.1 [2].

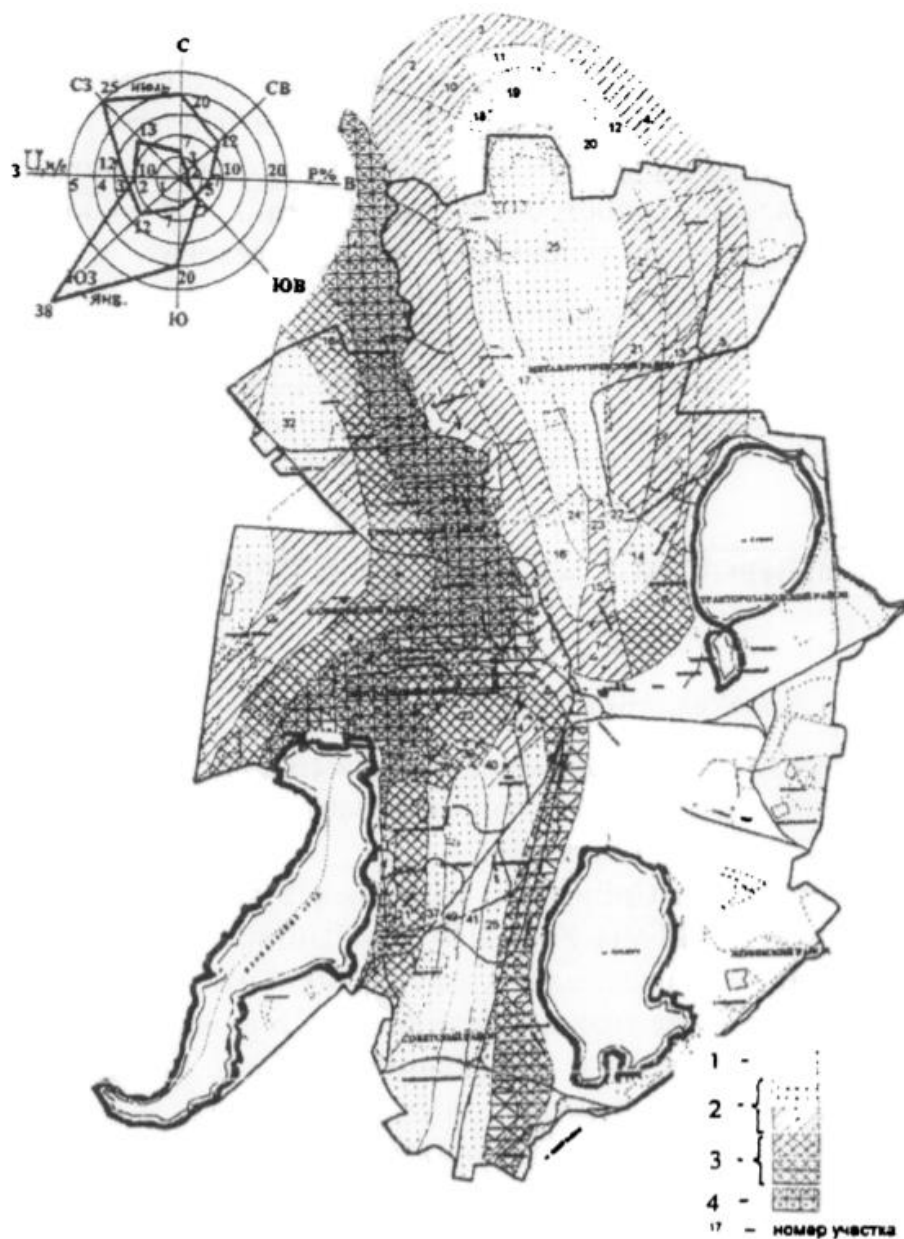


Рисунок 1.1 – Карта аэрационного режима г. Челябинска: 1 – территории благоприятные (хорошо проветриваемые); 2 – относительно благоприятные (проветриваемые); 3 – относительно неблагоприятные (удовлетворительно проветриваемые); 4 – неблагоприятные (плохо проветриваемые)

Более детальные карты аэрационного режима, применимые для проектирования застройки, строятся на основе расчетов ветрового режима в зависимости от геометрических параметров и взаиморасположения зданий для обеспечения комфортности пребывания человека. В основу этой методики положены труды Ф.Л. Серебровского, в которых предлагается учитывать ветровой режим при помощи построения и анализа локальных роз ветров [1, 3].

Также, проблема учета аэрационного режима застройки подробно исследована в руководстве по оценке и регулированию ветрового режима жилой застройки, разработанном в ЦНИИП градостроительства. В этом руководстве приводятся результаты детального исследования процесса прохождения воздушного потока через различные формы застройки. Также, в нем описывается методика оценки ветрового режима застройки, основанная на результатах исследований в аэродинамической трубе и рекомендации по проектированию с учетом ветрового режима [4].

На сегодняшний день можно выделить следующие основные проблемы современного состояния вопроса учета аэрационного режима застройки:

1. Общий высокий уровень сложности проведения мероприятий по учету ветрового режима застройки на различных этапах территориального планирования и градостроительного проектирования;
2. Низкий уровень освещенности в нормативной литературе;
3. Недостаток теоретических исследований в этом направлении.

Общая теория градостроительного проектирования с учетом ветрового режима достаточно разработана и подробно освещена в трудах Ф.Л. Серебровского, Э.И. Реттера, Р.Г. Коноплевой, Е.Н. Романовой, Н.З. Битколова, В.С. Никитина, В.Д. Оленькова и др. Эти труды основывались на результатах экспериментальных исследований в аэродинамической трубе и теоретических изысканий.

1.2. Анализ современного состояния проблемы расчета ветровых нагрузок с учетом локальных изменений скорости ветра

Архитектурно-строительная аэродинамика существует с середины XIX-го века и сегодня представляет собой хорошо изученную, систематизированную и применяемую на практике науку, продолжающую развиваться. Наибольший вклад в изучение аэродинамики зданий внесли такие ученые как Э.И. Реттер, Ф.Л. Серебровский, Г.А. Савицкий, А.С. Бернштейн, Б.Г. Коренев, С.М. Горлин и др.

На сегодняшний день существует много различных методик количественного определения ветрового давления на здания и учета его характеристик в зависимости от многих параметров. Нормативная литература в разных странах предлагает свои подходы к определению ветровой нагрузки, однако все они опираются на одну и ту же модель, разработанную в рамках науки аэродинамики. Основными параметрами этой модели выступают скорость ветра, характер ее распределения по высоте и т.н. аэродинамический коэффициент внешнего давления. Для задач строительства малой и средней этажности учет этих параметров не представляет особой сложности, а методика отработана и не нуждается в дополнении. Однако для высотных и уникальных зданий требуется скорее научный подход, чем инженерный, в связи с большим количеством параметров, которые необходимо учесть.

При этом возрастающие с каждым днем плотность и этажность городской застройки становятся тем фактором, который все больше отдаляет действительность от существующих норм. Ветровой поток, проходящий через застройку, трансформируется самым различным образом, в некоторых случаях увеличивая свою скорость и, как следствие, ветровое давление на здания. Этот фактор не учитывается ни в каких системах нормативной документации. При этом, существующая застройка в них учитывается как фактор, снижающий ветровое давление, что справедливо для зданий малой и средней этажности, хотя и не всегда.

Как отмечено выше, фактор ускорения ветра при прохождении через определенные формы застройки не учитывается в нормативной документации, при этом учитывается трансформация ветра при различных параметрах рельефа

(орографии местности). Например, Еврокод очень подробно учитывает эту особенность при помощи орографического коэффициента c_o . Графическое представление учета орографии местности согласно Еврокоду представлено на рисунке 1.2 [5].

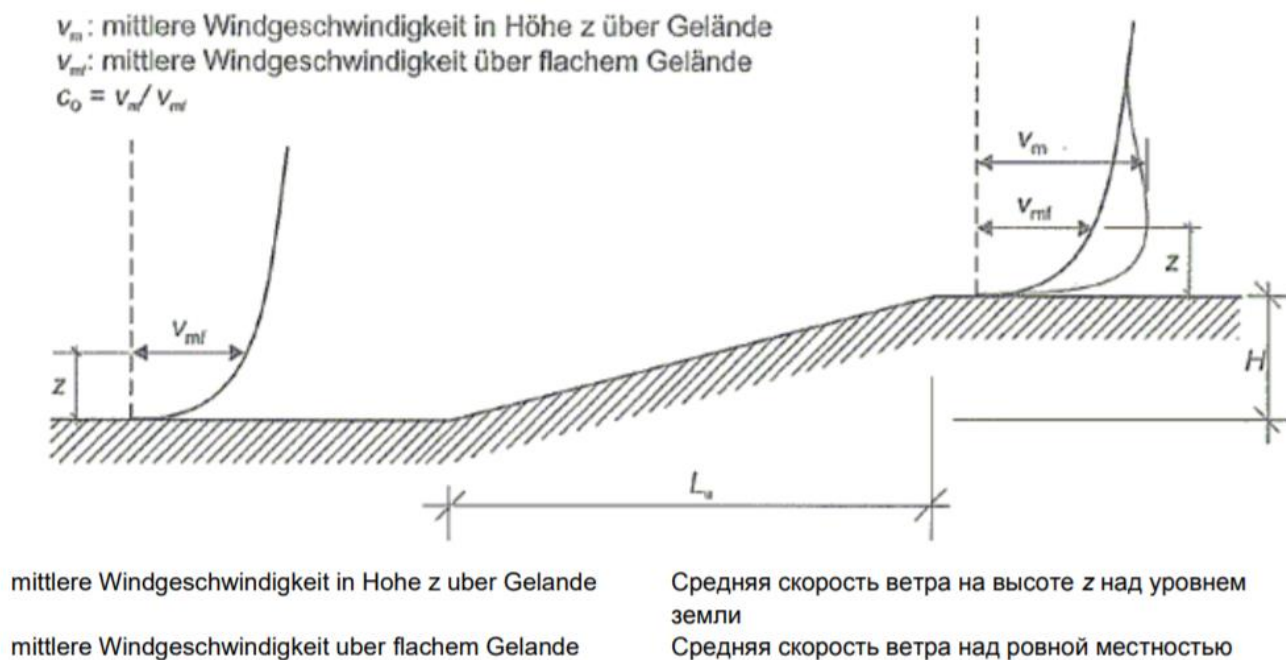


Рисунок 1.2 – Графическое представление увеличения скорости ветра над орографией

Помимо орографии, Еврокод учитывает воздействие более высокого близлежащего здания на ветровую нагрузку (рисунок 1.3).

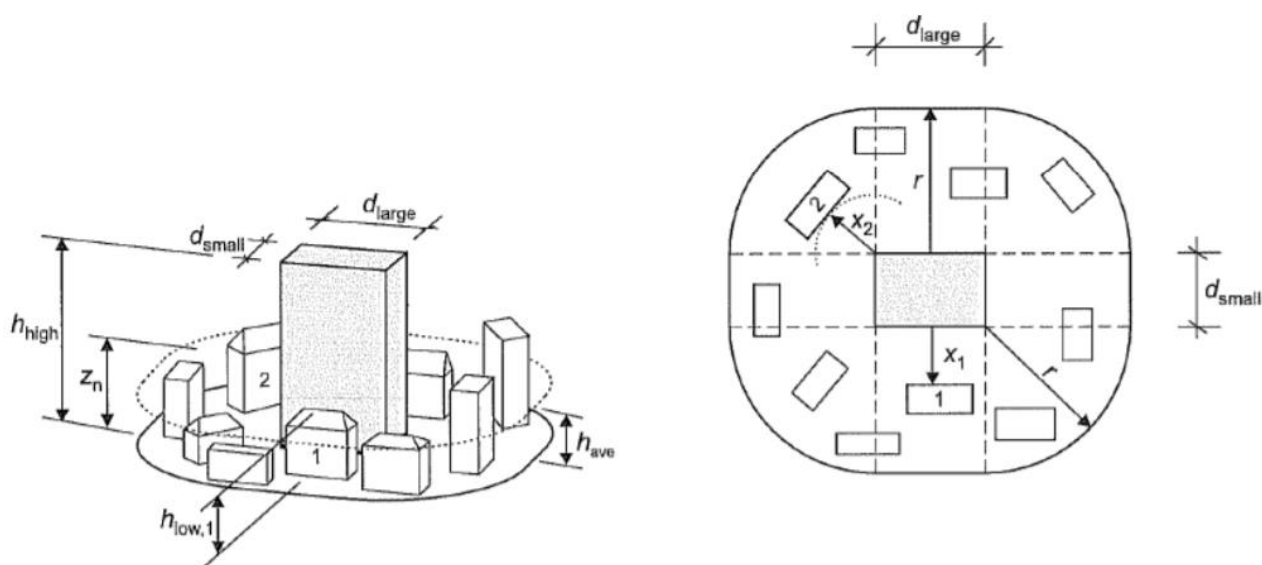


Рисунок 1.3 – Влияние высокого здания на два разных соседних здания

При этом, отечественные нормы не учитывают особенности местности, увеличивающие ветровую нагрузку, и более того снижают величину нормативного ветрового давления с увеличением плотности застройки. Это выглядит разумным на больших масштабах, однако при рассмотрении локальной картины распределения может оказаться неприменимым. Это демонстрирует схема, представленная на рисунке 1.4.

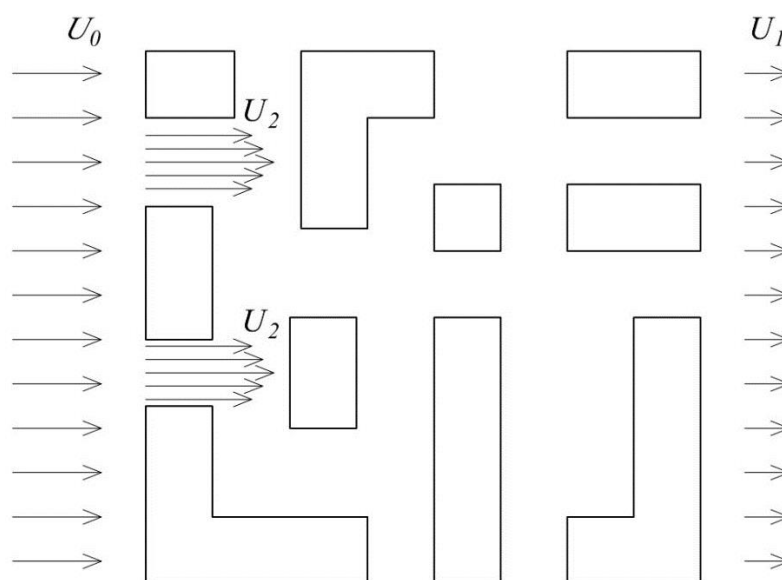


Рисунок 1.4 – Схема трансформации ветрового потока

На рисунке 1.4 U_0 – набегающий ветровой поток, U_1 – прошедший через застройку, трансформированный воздушный поток со сниженной скоростью, U_2 – локально трансформированный воздушный поток с увеличенной скоростью. Очевидно, что прошедший через застройку ветровой поток снижает скорость, однако в некоторых случаях происходит резкое ускорение ветра и, как следствие увеличение ветрового давления.

Изучение ветрового режима застройки позволяет определить зоны локальных изменений скорости и наглядно показывает характер этих изменений. На рисунке 1.5 приведен результат эксперимента численного моделирования ветрового режима микрорайона [6].

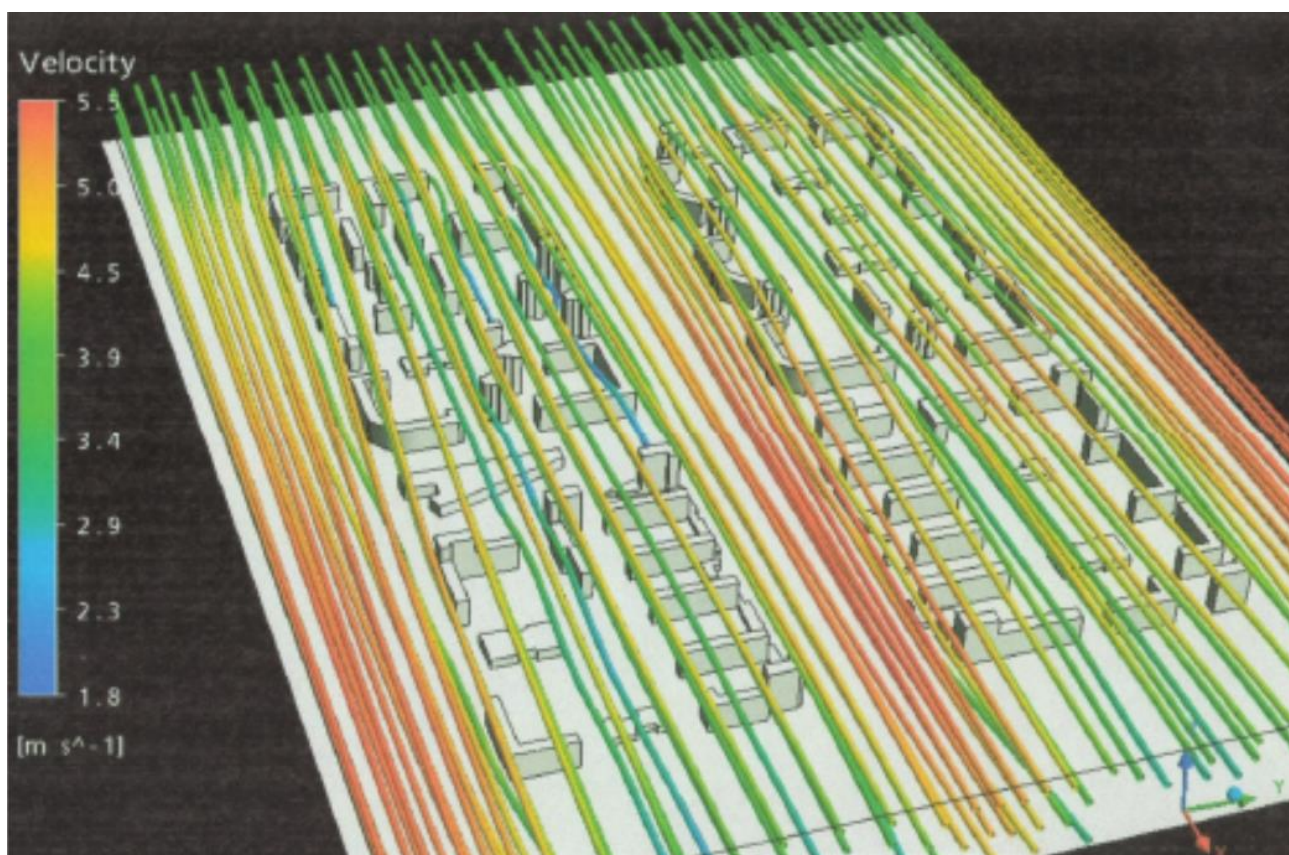


Рисунок 1.5 – Численное моделирование ветрового режима микрорайона

Этот эффект не учитывается в нормативной литературе, однако его влияние может быть довольно опасным, поскольку скорость ветра может увеличиваться в несколько раз. При проектировании высотных и уникальных зданий проводятся масштабные исследования методами физического или численного моделирования процесса обтекания воздушным потоком здания. Это позволяет получить более точные значения ветровых давлений и аэродинамических коэффициентов, но при этом довольно затратно.

На рисунке 1.6 представлен фрагмент карты г. Москвы, на котором показан строящийся жилой комплекс «Небо», состоящий из трех зданий по 50 этажей каждое.

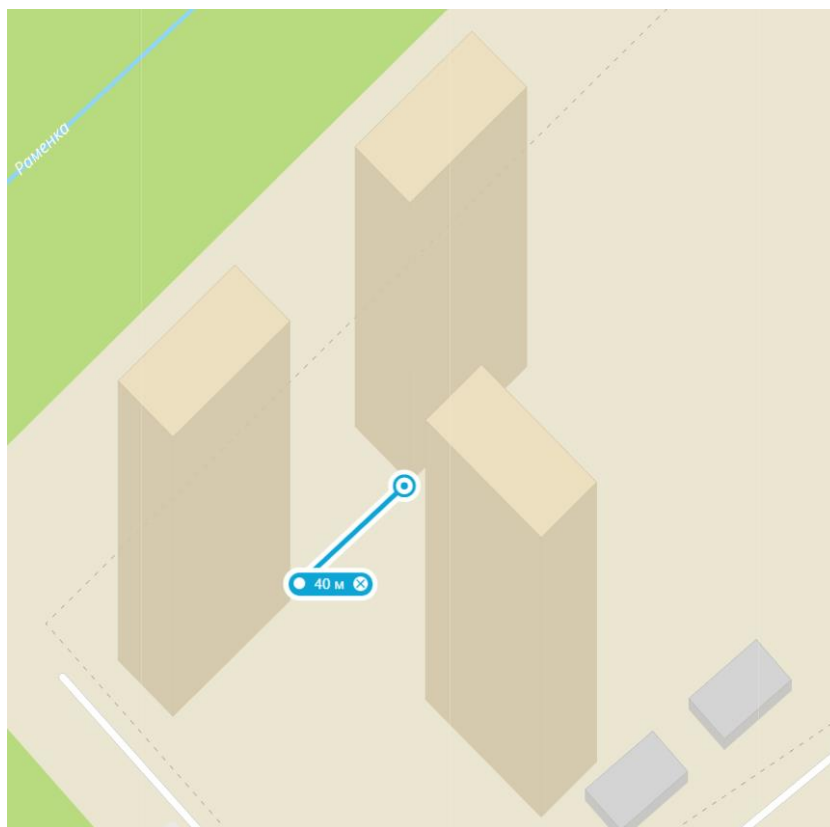


Рисунок 1.6 – Фрагмент карты г. Москвы с расположением ЖК «Небо»

Как видно из рисунка 1.5 здания расположены в вершинах равнобокого треугольника со стороной приблизительно 50-60 м. Ширина разрыва между зданиями в свету составляет примерно 40 м. Таким образом, на каждое здание будет действовать по одному трансформированному воздушному потоку с увеличенной скоростью ветра. Подобные ситуации встречаются довольно часто.

Как уже отмечалось выше, в отечественной нормативной документации (СП) расчет ветровой нагрузки осуществляется с учетом типа местности, в зависимости от которого изменяется интенсивность ветрового потока и, как следствие, давления. Оно рассчитывается при помощи коэффициента $k(z_e)$, учитывающего изменение ветрового давления по высоте и зависящего от типа местности. Согласно СП 20.13330.2016. «Нагрузки и воздействия» тип местности «А» соответствует открытой местности, а тип «С» – плотной городской застройке зданиями высотой более 25 м. При этом, ветровое давление в местности типа «С» меньше, чем в местности типа «А» в 1,25-2,5 раза в зависимости от высоты. Аналогично производится учет местности и в Еврокоде [5, 7].

Однако условия, при которых возникают локальные увеличения скоростей ветра не учитываются при расчете. Частично этот эффект перекрывается коэффициентом надежности по нагрузке γ_f , принимаемый для ветровой нагрузки равным 1,4. При этом, данный коэффициент не предназначен для учета этого явления и возможно не удовлетворяет в полной мере условиям обеспечения жесткости и устойчивости здания. Одной из задач данной работы является проверка этой гипотезы путем объединения методик учета ветрового режима застройки и расчета ветровых нагрузок. При этом в данной работе рассматривается только основная ветровая нагрузка (без учета пульсационной составляющей, т.к. она зависит от основной).

1.3. Основные положения и принципы аэродинамики плохообтекаемых тел

Наука аэродинамика в начале своего развития ставила своей целью исследование механики полетов и понимание принципов процесса обтекания воздухом достаточно простых с точки зрения этой науки тел. Однако, с развитием строительства появлялись различные направления и ответвления аэродинамики, связанные с изучением плохообтекаемых тел.

Основоположником теории сопротивления воздуха является И. Ньютон, определивший следующие зависимости: сила, действующая на тело, движущееся в жидкости, пропорциональна квадрату скорости движения, плотности жидкости и квадрату линейных размеров тела.

Значительный вклад в развитие аэродинамики внесли такие ученые как Л. Эйлер, который вывел уравнения движения и равновесия жидкостей и газов, Д. Бернулли, установивший связь между удельными энергиями потенциальной и кинетической при движении жидкости, вывел уравнение, учитывающее вязкость среды (уравнение Бернулли). В XIX веке учеными А. Навье и Дж. Стоксом были окончательно выведены общие уравнения пространственного движения вязкой жидкости, называемые уравнениями Навье-Стокса. Эти уравнения лежат в основе всей гидрогазодинамики и применяются при численном моделировании аэродинамических процессов [8].

Английский ученый о. Рейнольдс экспериментально установил (1876—1883 гг.) критерий перехода ламинарного режима движения жидкости, текущей в цилиндрической трубе, в турбулентный режим. Критерий определяется безразмерной величиной, называемой числом Рейнольдса [9].

Примерно в это же время была построена первая аэродинамическая труба, что послужило новым стимулом для развития аэродинамики. Вскоре такие трубы были построены во всех развитых странах.

В начале XX в. была разработана теория подобия и установлены её основные критерии: число Рейнольдса (Re), Струхаля (Sh), Эйлера (Eu), Маха (M) и др.

Число Рейнольдса – безразмерная величина, характеризующая отношение нелинейного и диссипативного членов в уравнении Навье — Стокса [10].

Число Струхала – безразмерная величина, один из критериев подобия нестационарных (часто колебательных) течений жидкостей и газов [11].

Лобовое сопротивление – сила, препятствующая движению тел в жидкостях и газах. Лобовое сопротивление складывается из двух типов сил: сил касательного (тангенциального) трения, направленных вдоль поверхности тела, и сил давления, направленных по нормали к поверхности [12, 13].

Вязкость (внутреннее трение) – одно из явлений переноса, свойство текучих (жидкостей и газов) и твёрдых (металлов, полупроводников, диэлектриков, ферромагнетиков) тел оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. В результате работа, затрачиваемая на это перемещение, рассеивается в виде тепла. Различают динамическую вязкость (единица измерения в Международной системе единиц (СИ) – Па·с) и кинематическую вязкость (единица измерения в СИ – м²/с) [14].

1.4. Существующие способы проведения исследований аэродинамических процессов

В настоящее время благодаря развитию теории аэродинамических процессов разработаны и отлажены методы как физического моделирования (аэродинамическая труба, гидрлоток), так и численного моделирования в программных комплексах. Также, известны графоаналитические методы (построение карт аэрационного режима), основанные на экспериментальных данных и позволяющие серьезно упростить процесс учета ветрового режима, без проведения экспериментальных исследований.

Наиболее предпочтительными из них являются методы физического моделирования в аэродинамической трубе, благодаря своей наглядности и простоте осуществления экспериментов. Главный недостаток этого метода заключается в низком уровне доступности проведения качественных исследований в общем случае. Маломасштабные аэродинамические трубы, применяемые в строительстве достаточно распространены, но не позволяют проводить эксперименты с достаточной точностью [15, 16].

Эксперименты физического моделирования позволяют получить такие данные о распределении воздушного потока, как:

- скорость и направление ветра;
- значения давлений ветра на поверхность испытываемой модели;
- векторное поле скоростей (с применением дорогостоящего оборудования).

Современные системы определения параметров воздушного потока в аэродинамической трубе позволяют получить высококачественные и информативные данные, но малодоступны вследствие своей высокой стоимости. Например, в МГСУ построена аэродинамическая труба с высоким уровнем технического оснащения (рис. 1.7). Лазерная система цифровой трассерной визуализации и лазерная система доплеровской velocиметрии в совокупности с

необходимым программным обеспечением позволяет получать качественные и количественные картины распределения воздушного потока (рис. 1.8) [17].



Рис. 1.7 – Аэродинамическая труба МГСУ

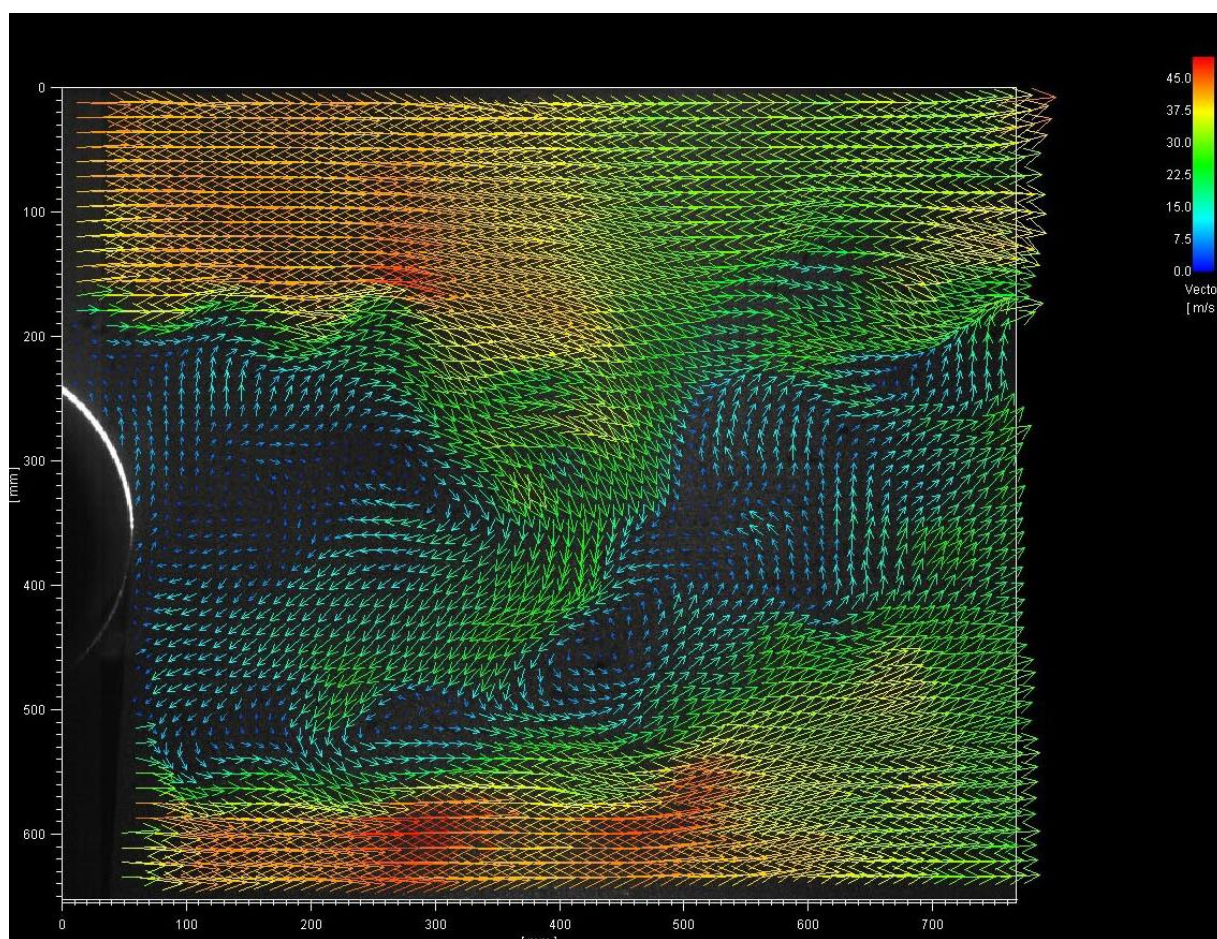


Рисунок 1.8 – Пример картины распределения воздушного потока в замкнутом объеме, полученной методом лазерной доплеровской velocиметрии (PIV)

В то же время существует большое количество программных комплексов, позволяющих производить моделирование аэродинамических процессов с достаточной точностью. В их основе лежит вычислительная гидродинамика (также CFD от англ. computational fluid dynamics) — подраздел механики сплошных сред, включающий совокупность физических, математических и численных методов, предназначенных для вычисления характеристик потоковых процессов [20].

Для решения задач аэрации населенных мест, в которых необходимо выявить лишь характер распределения воздушного потока (качественная картина) и величины скоростей, достаточно функционала сравнительно простых программных комплексов (Autodesk FlowDesign). Однако для задач, связанных с определением ветровой нагрузки, необходимо более серьезное ПО (ANSYS CFX, ANSYS Fluent).

Существует множество различных программных комплексов, реализующих расчеты вычислительной гидрогазодинамики методом конечных элементов (МКЭ). Однако наиболее эффективным методом решения таких задач является метод конечных объемов (МКО), реализуемый в ПК ANSYS Fluent. Этот ПК является самым распространенным за рубежом и применяется в большинстве случаев [18, 19].

ГЛАВА 2. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

2.1. Описание методики проведения исследования

Основными параметрами, определяющими значение ветрового давления, являются плотность воздуха γ и скорость ветра v . Согласно уравнению Бернулли, ветровая нагрузка прямо пропорциональна квадрату скорости ветра:

$$w = \frac{\gamma v^2}{2}. \quad (2.1)$$

Согласно СНиП 2.01-07-85 нормативное значение ветрового давления определяется по формуле [21]:

$$w_0 = 0,61v_0^2, \quad (2.2)$$

что соответствует $\gamma = 1,22 \text{ кг/м}^3$. При этом v_0 – скорость ветра, соответствующая 10-минутному интервалу осреднения и превышаемая в среднем один раз в 5 лет.

В СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» для нормативного значения ветрового давления приведена формула [7]:

$$w_0 = 0,43v_0^2. \quad (2.3)$$

Здесь v_0 – скорость ветра, соответствующая 10-минутному интервалу осреднения и превышаемая в среднем один раз в 50 лет.

Расчетное значение ветрового давления определяется умножением нормативного значения на коэффициент надежности $\gamma_f = 1,4$. В результате этой операции выражение (2.3) преобразуется в формулу:

$$w_0 = 0,61v_0^2, \quad (2.4)$$

которая не является идентичной формуле (2.2), поскольку в первом случае определяется нормативное значение ветровой нагрузки, а во втором расчетное.

Согласно Еврокоду, базовое значение скоростного напора q_b (аналог w_0 из СП) определяется из уравнения Бернулли (2.1) при плотности воздуха $\gamma = 1,25 \text{ кг/м}^3$ [5].

Таким образом, в отечественных и зарубежных нормах нормативное значение ветрового давления определяется аналитически, основываясь на данных о скоростях ветра, по уравнению Бернулли. То есть фактически это означает, что давление ветра принимается таким, каким оно было бы при воздействии ветра известной скорости на преграду, которая не оказывает влияния на характеристики самого воздушного потока. Наглядно это отображено на рисунке 2.1.

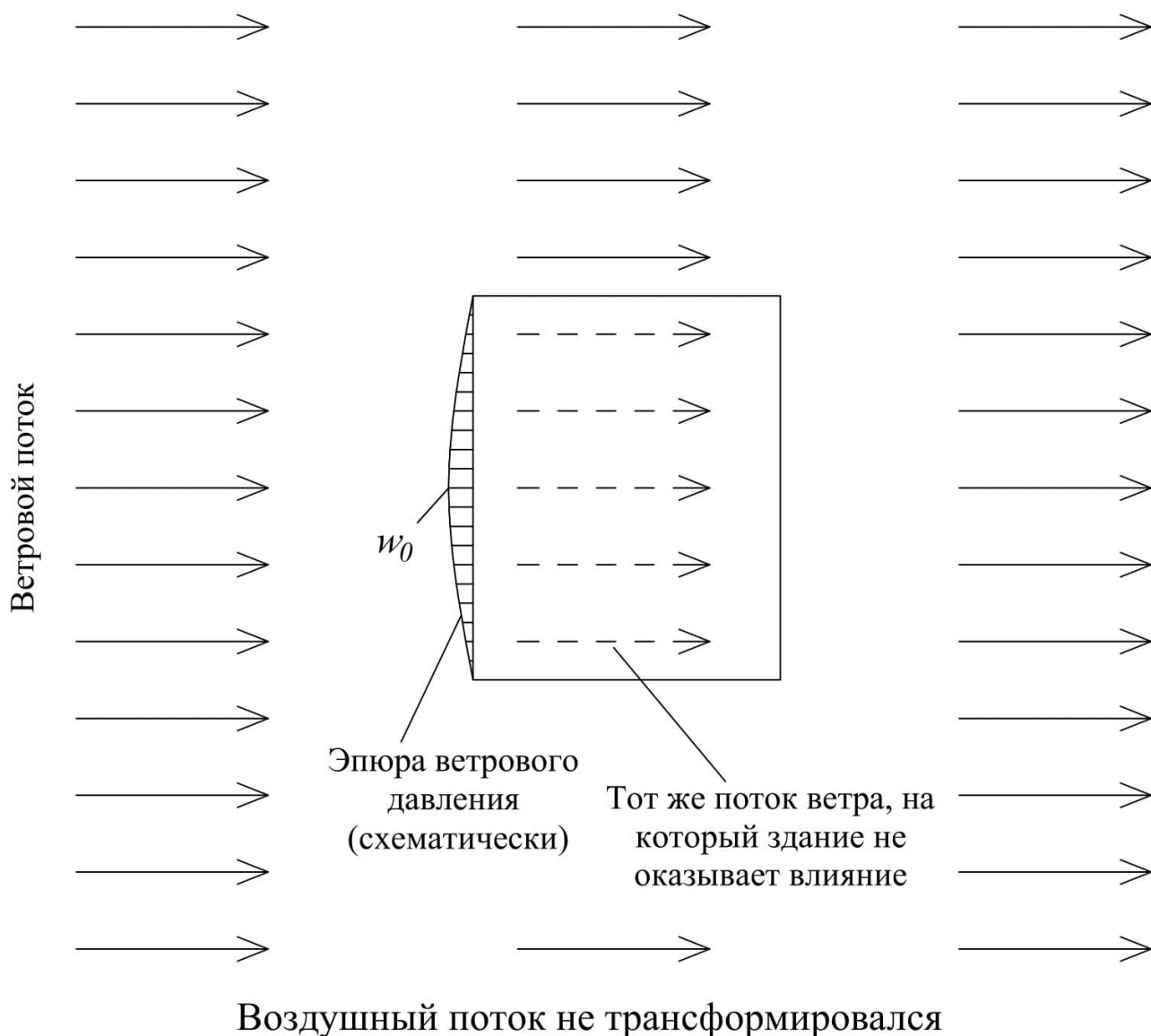
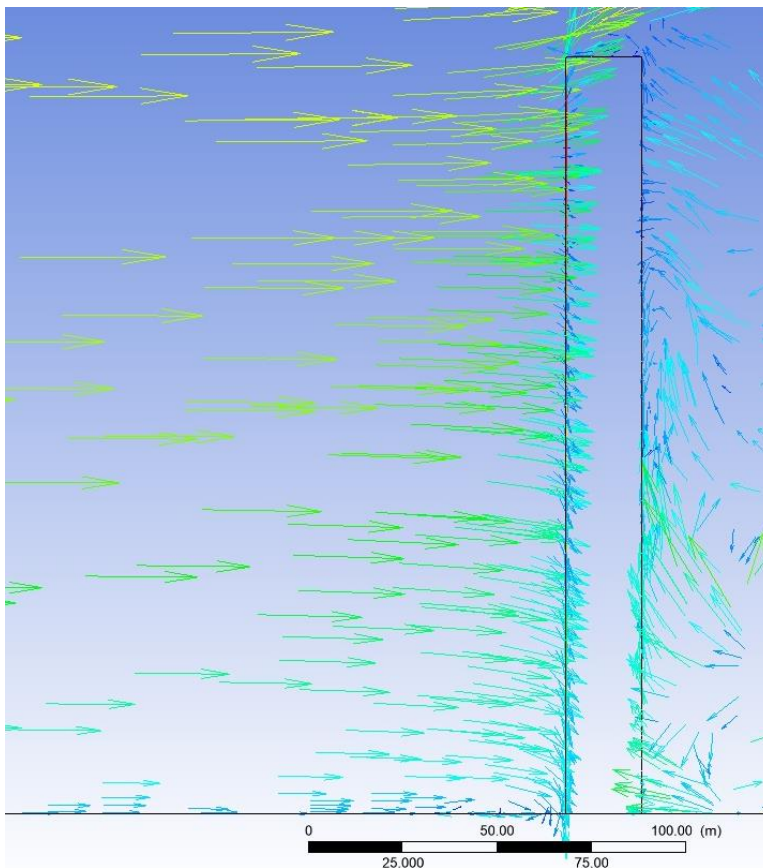


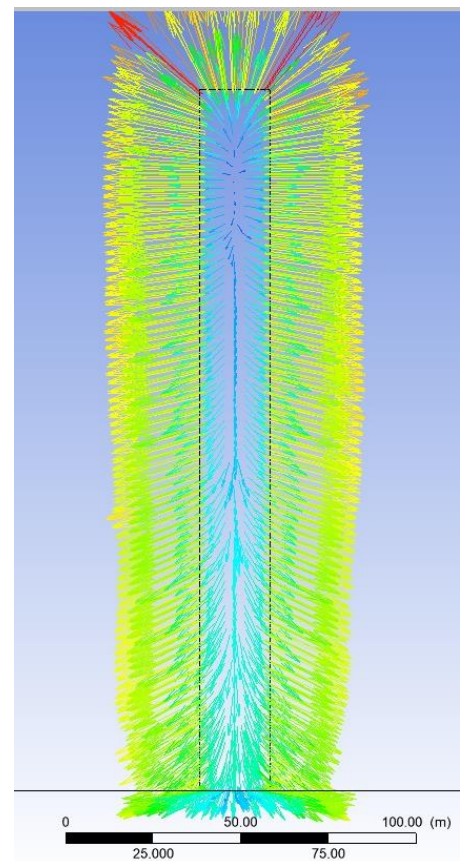
Рисунок 2.1 – Схема определения ветрового воздействия из уравнения Бернулли

Как видно из рисунка 2.1, нормативное значение ветрового давления определяется «идеальным», то есть таким, при котором исключается воздействие преграды на воздушный поток. Согласно СП 20.13330.2016 отклонения от нормативного значения в известной степени перекрываются введением коэффициента надежности по нагрузке, принимаемого равным 1,4. А сам характер распределения ветрового давления по поверхности фасада учитывается введением аэродинамического коэффициента внешнего давления, равного 0,8. Все это призвано упростить задачу определения ветрового давления для проектировщиков.

Однако при определении ветрового давления методами численного моделирования, при которых значения давлений снимаются непосредственно с поверхности фасада, результаты могут значительно отклоняться от рассчитанных по методам, принятым в нормативной литературе. Это связано с характером распределения скоростей ветра по высоте – т.н. логарифмический профиль скоростей ветра. Шероховатость поверхности земли оказывает влияние на профиль ветра, вследствие чего его скорость с ростом высоты возрастает, при чем нелинейно. Результаты экспериментов численного моделирования в ПК Ansys Fluent, проведенных в рамках данного исследования показали, что характер распределения давлений на фасаде прямоугольного в плане здания находится не в прямой зависимости от профиля скорости ветра. Это связано с тем, что давление от ветра на высоте выше давления от ветра внизу здания. Вследствие чего более быстрые потоки воздуха при столкновении с фасадом здания устремляются вниз, тем самым увеличивая давление внизу (Рисунок 2.2).



а)



б)

Рисунок 2.2 – Векторное поле скоростей ветра при столкновении с расчетной моделью: а) в плоскости, параллельной направлению ветра;
 б) в плоскости фасада

Как видно из рисунка 2.б), часть воздушного потока рассекается зданием и уходит в стороны, небольшая часть потока сверху здания поднимается вверх, а в центральной части фасада вектора скорости ветра направлены вниз, где потоку препятствует поверхность земли. Вследствие этого ветровое давление внизу здания оказывается выше, чем должно быть по уравнению Бернулли. Это отражает график распределения максимальных давлений по высоте здания, представленный на рисунке 2.3.

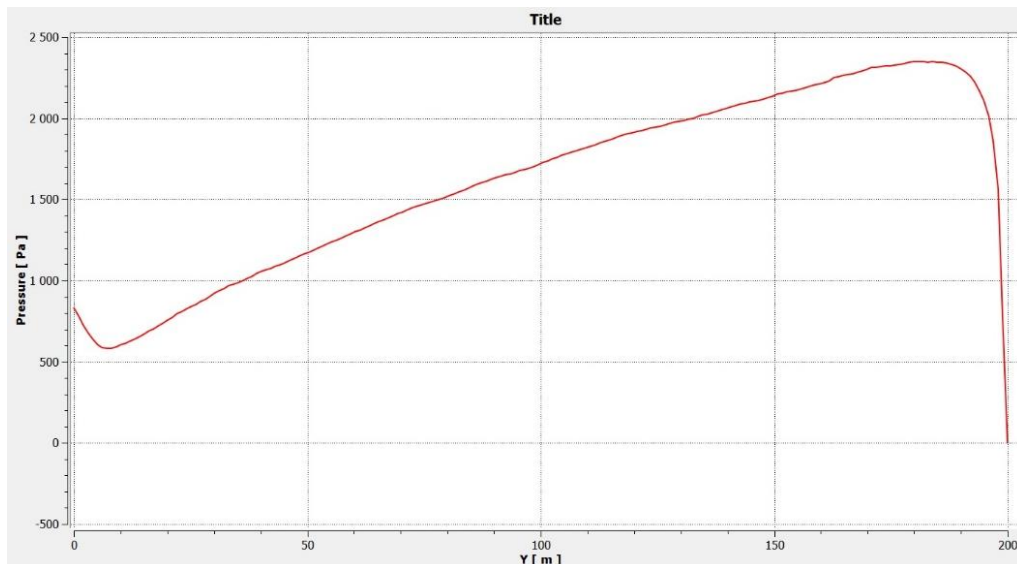


Рисунок 2.3 – График распределения максимальных давлений по высоте здания (по горизонтальной оси высота здания в метрах, по вертикальной – значения давлений в паскалях), взятый с линии по центру фасада

Как видно из рисунка 3, зависимость давлений от высоты здания слабо соответствует логарифмическому профилю ветра, хотя тенденция роста давления с высотой очевидна. В нижней части здания давления выше, чем должны быть исходя из уравнения Бернулли.

Таким образом, суммарное давление ветра на фасаде здания, полученное в экспериментах численного моделирования оказалось выше, чем рассчитанное в соответствии с СП. Это приводит к конфликту двух методов определения давления – численного моделирования и описанного в нормативной литературе.

Для исследования эффектов ускорения ветра необходимо определиться с выбором методики: давление ветра пропорционально скорости (уравнение Бернулли) и зависит только от профиля ветра по высоте либо давление ветра определяется фактически, по результатам численного моделирования.

Очевидно, что нормативная литература базируется на серьезных, проверенных результатах исследований, что не дает повода усомниться в их корректности. Однако для проведения данного конкретного исследования очень важно выбрать наиболее точный метод. Разница в этих подходах проиллюстрирована на рисунке 2.4.

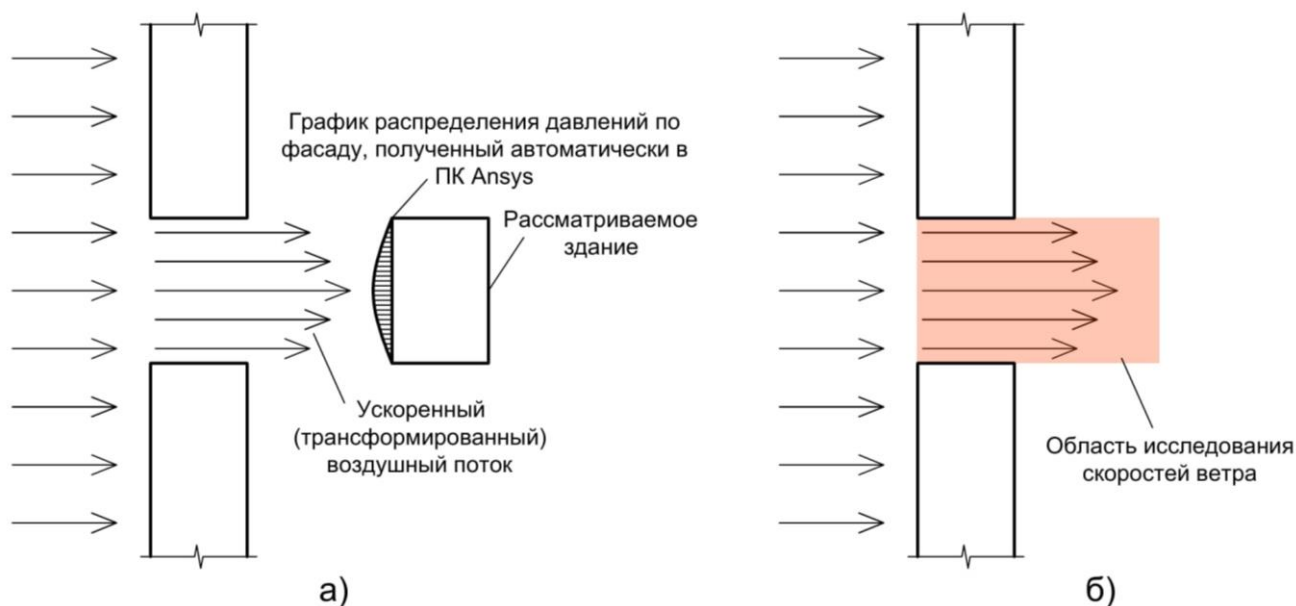


Рисунок 2.4 – Общая схема подходов к определению ветрового давления от трансформированного воздушного потока:

- а) получение значений ветрового давления автоматически из ПК Ansys;
- б) исследование характеристик трансформированного воздушного потока с дальнейшим расчетом ветрового давления по уравнению Бернулли

На рисунке 2.4а) представлена схема автоматического способа получения значений ветрового давления из ПК Ansys. На рисунке 3.б) красным выделена область, в которой исследуются скорости трансформированного воздушного потока для определения ветрового давления методом, описанным в СП. То есть во втором методе рассматриваемое здание исключается из расчетной области, а основным фактором ветрового давления становится скорость воздушного потока.

Очевидно, что второй метод, при том, что является идеализированным, предпочтительнее, т.к. описан в СП и апробирован, в то время как первый метод, хотя и является достаточно точным, дает неоднозначные результаты ввиду сложного способа учета характера распределения давлений по фасаду здания.

В итоге был сделан вывод о том, что наиболее точным и в то же время надежным методом исследования является метод №2 как идеализированный, однако при этом должен учитываться характер распределения давлений по фасаду здания, для чего дополнительно необходимо провести исследования по методу №1.

Для получения достоверных результатов и возможности осуществления их проверки исследование было разбито на 2 этапа:

1. Определение скоростей трансформированного воздушного потока, прошедшего через разрыв между двумя зданиями (количественная картина);
2. Определение характера воздействия трансформированного воздушного потока на здание (качественная картина).

Принципиальная схема проведения исследования изложена на рисунке 5.

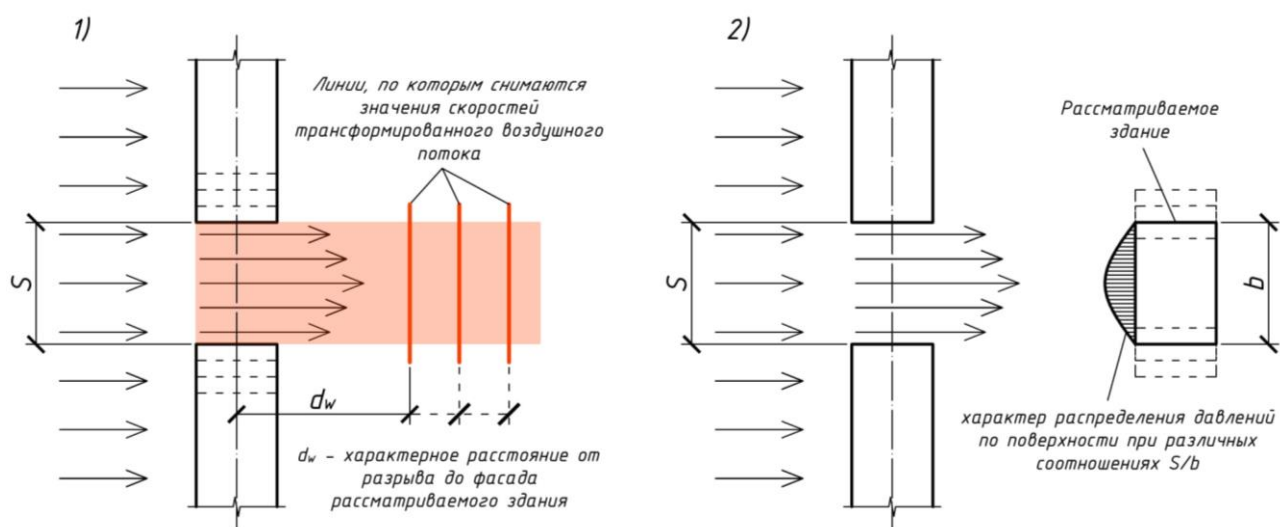


Рисунок 2.5 – Принципиальная схема проведения исследования

Исследования первого этапа проводятся для определения изменений скорости в зависимости от ширины разрыва. Второй этап исследования необходим для определения характера распределения давления по поверхности в зависимости от соотношения ширины разрыва и ширины здания.

Эксперимент численного моделирования ветрового воздействия на здания проводится в 5 этапов:

1. Создание модели исследуемой ситуации в программной среде Autodesk Autocad;
2. Экспорт модели в ПК Ansys Fluent и создание расчетной области (виртуальная аэродинамическая труба) (рисунок 2.6);
3. Создание расчетной конечно-объемной сетки (рисунок 2.7);

4. Задание входных параметров расчета (скорости ветра, плотность воздуха и т.д.);
5. Расчет с контролем параметров.

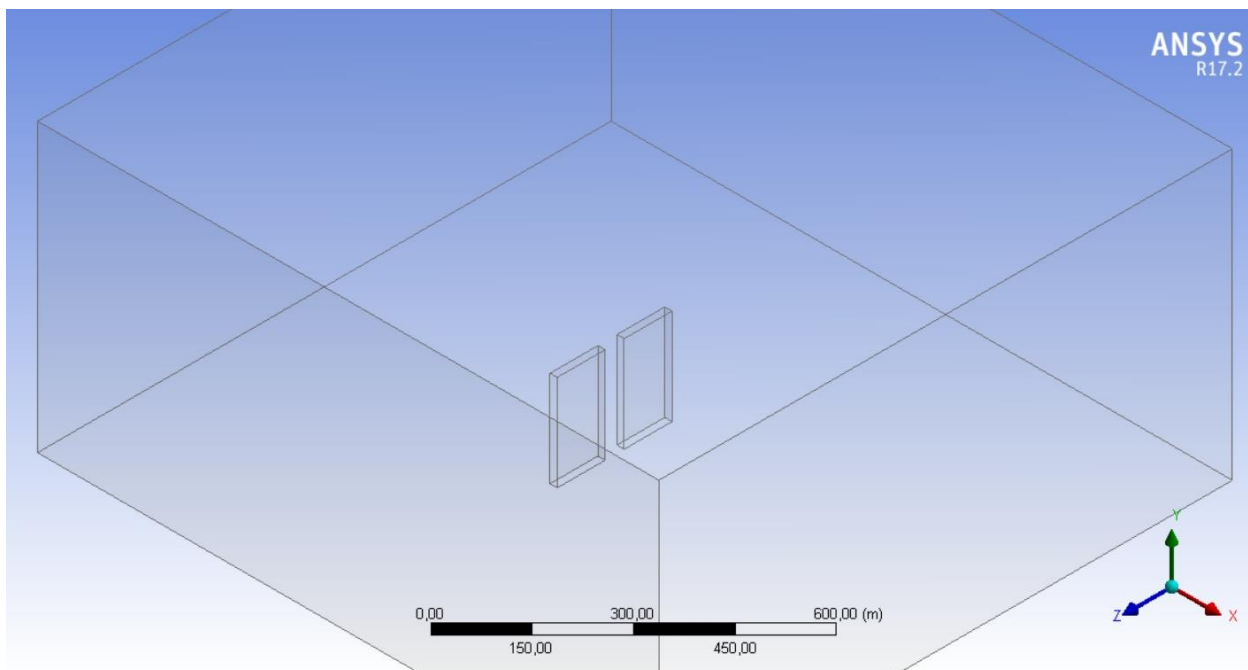
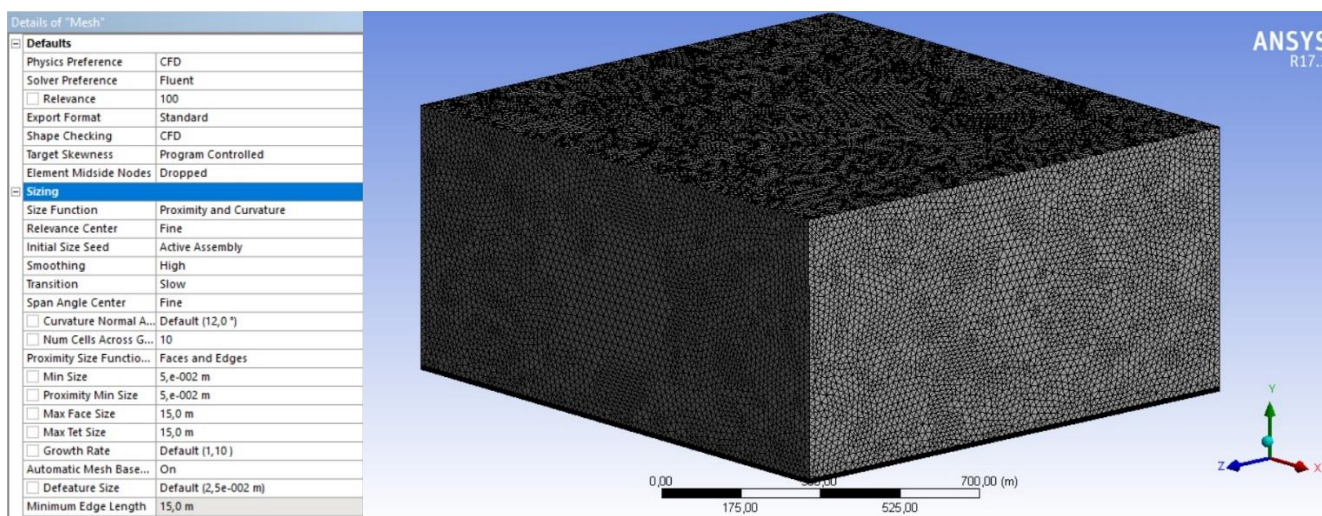


Рисунок 2.6 – Пример построенной расчетной области

Затем, в модуле Ansys Meshing создается расчетная конечно-объемная сетка с параметрами, представленными на рисунке 7а). На рисунке 7б) представлена готовая расчетная сетка.



а)

б)

Рисунок 2.7 – Создание расчетной конечно-объемной сетки:

а) параметры сетки; б) сгенерированная расчетная сетка

Как видно из рисунка 7а) размеры ячеек сетки принимают значения от 0,05 м (вблизи зданий и поверхности земли) до 15 м (на значительном удалении от здания). Это связано с тем, что высокая точность результатов необходима только в непосредственной близости от здания, где будут сниматься значения скоростей и давлений [22].

Далее, уже в самом модуле Ansys Fluent задаются исходные параметры. Плотность воздуха принимается равной 1,225 кг/м³, вязкость – 1,789 Па·с, то есть эти параметры соответствуют температуре воздуха 15,0° С [23, 24].

Скорость ветра необходимо задавать в виде логарифмического профиля – функции распределения. В программном комплексе Ansys Fluent есть возможность задать профиль аналитическим методом – в виде функции, описанной языком программирования.

Согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», изменение скорости ветра по высоте учитывается при помощи коэффициента $k(z_e)$, определяемого по таблице 11.2, либо по формуле 11.4 [7]:

$$k(z_e) = k_{10} \left(\frac{z_e}{10} \right)^{2\alpha}, \quad (2.5)$$

где k_{10} и α – коэффициенты, определяемые по таблице 11.3 СП.

Таблицы 11.2 и 11.3 СП представлены в таблицах 2.1 и 2.2 [7].

Таблица 2.1 – Коэффициент k для типов местности (таблица 11.2 СП 20.13330.2016)

Высота z_e , м	Коэффициент $k(z_e)$ для типов местности		
	А	В	С
≤ 5	0,75	0,5	0,4
10	1,0	0,65	0,4
20	1,25	0,85	0,55
40	1,5	1,1	0,8
60	1,7	1,3	1,0
80	1,85	1,45	1,15
100	2,0	1,6	1,25
150	2,25	1,9	1,55
200	2,45	2,1	1,8
250	2,65	2,3	2,0
300	2,75	2,5	2,2

Таблица 2.2 – Значения параметров k_{10} и α для различных типов местности

Параметр	Тип местности		
	А	В	С
α	0,15	0,2	0,25
k_{10}	1,0	0,65	0,4
ζ_{10}	0,76	1,06	1,78

Типы местности:

А – открытые побережья морей, озер и водохранилищ, сельские местности, в том числе с постройками высотой менее 10 м, пустыни, степи, лесостепи, тундра;

В – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м;

С – городские районы с плотной застройкой зданиями высотой более 25 м.

Формула (5) представляет собой уравнение логарифмического профиля ветра, сокращенное на скорость ветра на высоте 10 м, то есть скорость ветра вынесена за скобки.

В общем виде функция логарифмического профиля скорости ветра имеет вид:

$$U(z) = U_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha, \quad (2.6)$$

где α – параметр, зависящий от типа местности.

Для задания профиля типа местности «С» необходимо сопоставить функцию распределения давлений по высоте здания (2.5) и уравнение (2.3), которое представляет собой преобразованное уравнение Бернулли:

$$w_0 \times k(z_e) = 0,43 \times v_{\text{фон}}^2(z_e), \quad (2.7)$$

$$300 \times 0,4 \times \left(\frac{z_e}{10} \right)^{0,5} = 0,43 \times v_{\text{фон}}^2(z_e),$$

$$279,07 \times \left(\frac{z_e}{10} \right)^{0,5} = v_{\text{фон}}^2(z_e),$$

$$v_{\text{фон}}^2 = \sqrt{279,07 \times \left(\frac{z_e}{10} \right)^{0,5}}.$$

$$v_{\text{фон}} = 16,7 \times \left(\frac{z_e}{10} \right)^{0,25}. \quad (2.8)$$

Выражение (2.8) представляет собой функцию распределения скорости ветра по высоте, при которой давления на фасад здания принимают значения в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», для II-го ветрового района с типом местности «С» (городские районы с плотной застройкой зданиями высотой более 25 м).

Таким образом, получен профиль скорости ветра, который вызывает давление на фасад здания, соответствующее II-му ветровому району и типу местности «С» (рисунок 2.8).

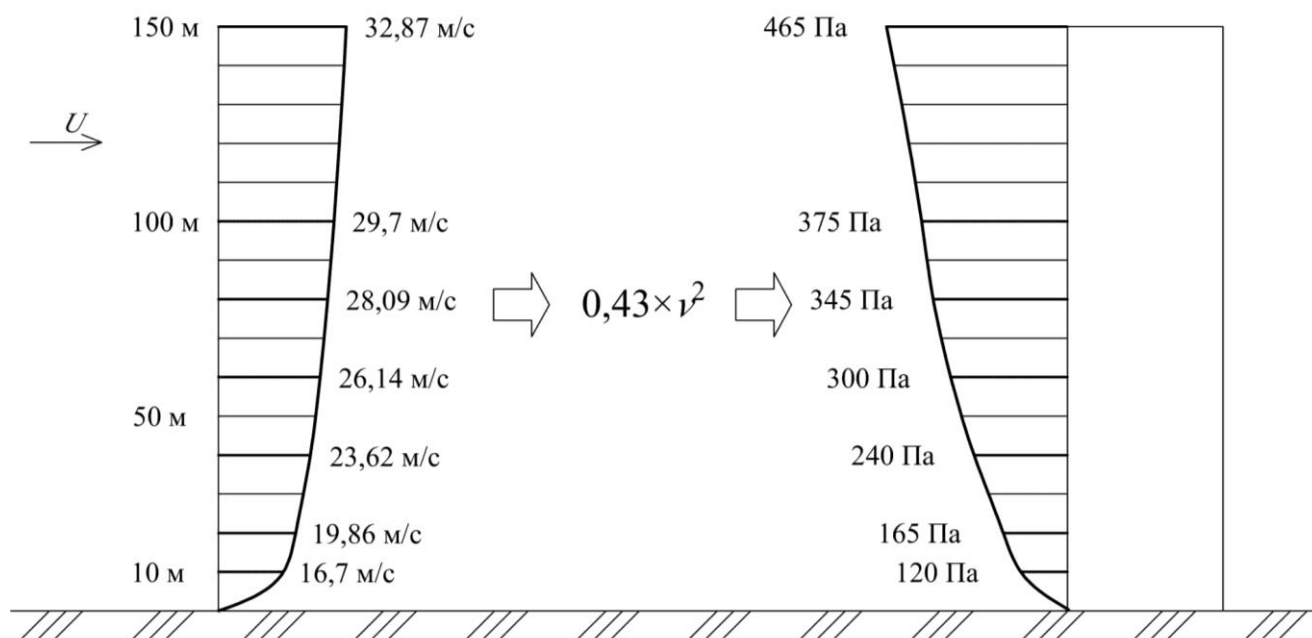


Рисунок 2.8 – Искомый логарифмический профиль ветра (слева), вызывающий давление, соответствующее II-му ветровому району и типу местности «С» (справа)

Далее необходимо представить выражение (2.8) в виде программного кода для ввода в ПК Ansys Fluent. На рисунке 2.9 представлено программное описание логарифмического профиля ветра, соответствующего II-му ветровому району местности типа «С».

```

#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE (velocity_profile, thread, position)
{
    float x[3]; float y; face_t f;
    float V = 16.7; float Z = 10; float alpha = 0.25;

    begin_f_loop(f,thread);
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        y=x[1];
        F_PROFILE(f,thread,position) = V*exp(alpha*log(y/Z));
    }
    end_f_loop(f,thread)
}

```

Рисунок 2.9 – Программный код для описания функции логарифмического профиля ветра, тип местности «С», II-ой ветровой район

Текстовый файл с программным кодом вводится в качестве исходного параметра Ansys Fluent посредством инструмента Functions, после чего указывается в окне параметров Inlet как параметр Velocity Magnitude.

Затем задается необходимое число итераций расчета, в данном случае оптимальным является 500, после чего запускается сам расчет.

2.2. Проведение численных экспериментов I-го этапа исследования

Для первого этапа исследования были проведены эксперименты численного моделирования по определению изменений скоростей ветра в зависимости от ширины разрыва между двумя зданиями. Ширина разрыва варьируется от 10 м до 50 м с шагом 5 м.

Значения скоростей трансформированного воздушного потока определяются при помощи функции Chart постпроцессора CFD Post. На характерных высотах и расстояниях от исследуемого разрыва строится линия, с которой автоматически снимаются значения скоростей и строятся графики (рисунок 2.10).

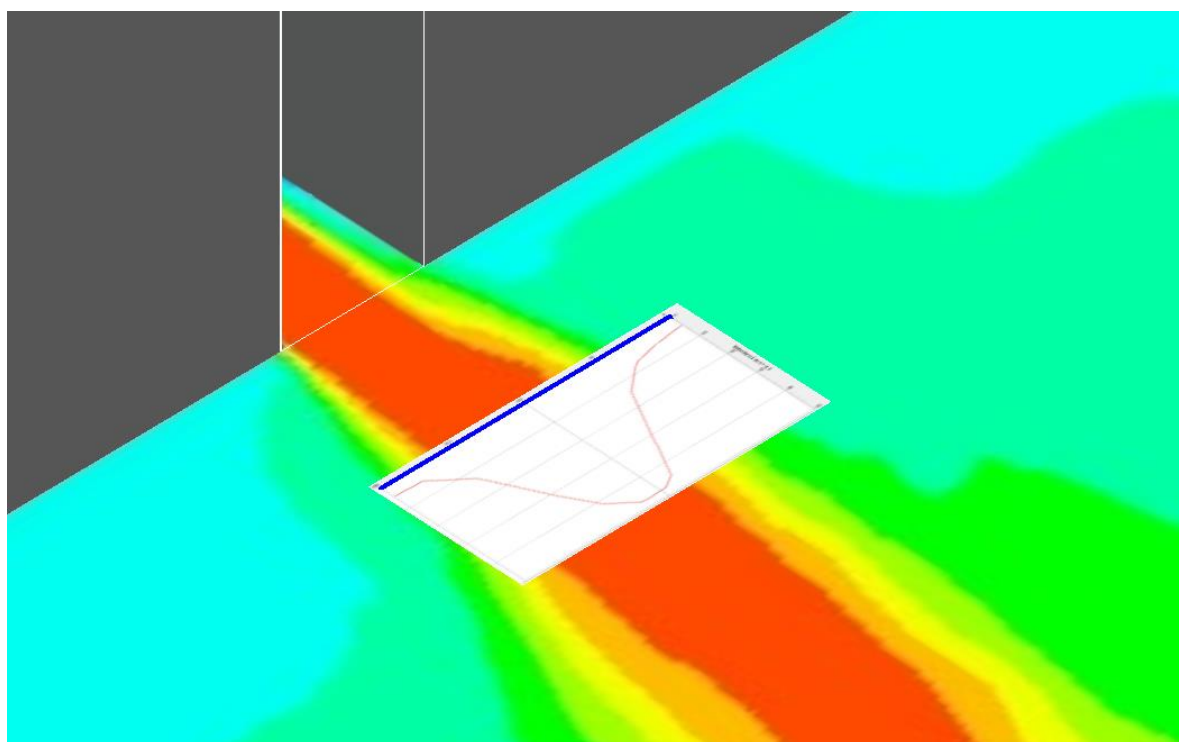


Рисунок 2.10 – Схема получения графика распределения скоростей ветра по ширине потока

На рисунке 1 синим цветом выделена линия, с которой снимаются значения графика. Положение этой линии задается вручную.

Полученные графики представляют собой распределение значений скорости трансформированного воздушного потока по ширине. Очевидно, что скорости распределены неравномерно, максимальные значения находятся в центральной части потока, к краям скорость существенно снижается (рисунок 2.11).

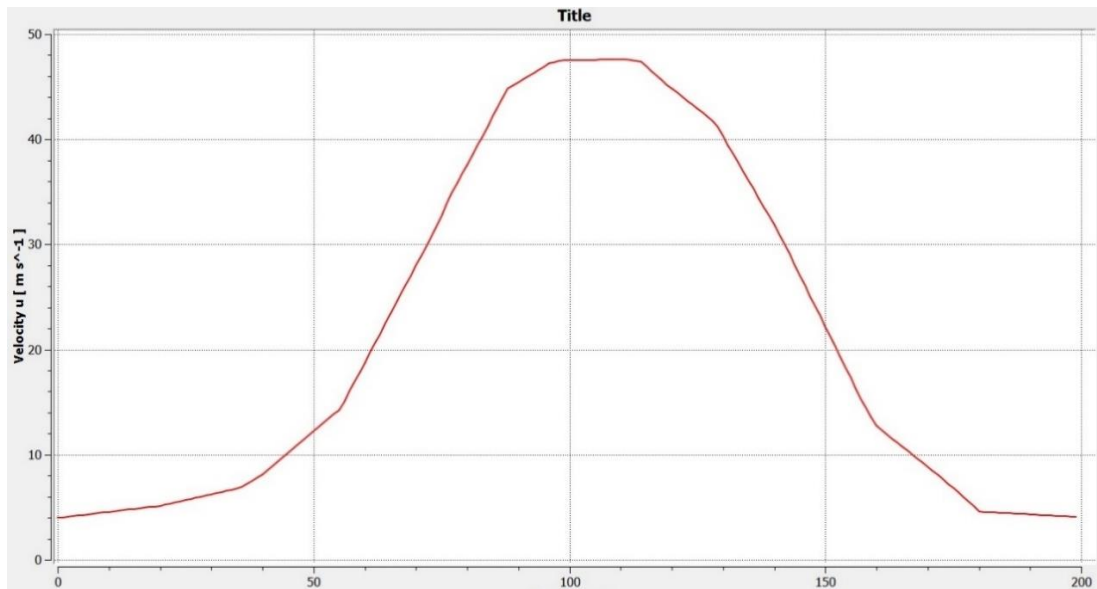


Рисунок 2.11 – Пример графика распределения скоростей ветра по ширине трансформированного потока

Таким образом, необходимо осреднить скорости по ширине потока, чтобы получить равномерную картину распределения. Это продиктовано тем фактом, что максимальное значение скорости ветра наблюдается в узком промежутке в середине потока и неспособно оказать серьезного влияния на давление по фасаду в целом. То есть необходимо выделить из графика и рассмотреть только ту его часть, которая превышает значение фоновой скорости ветра. Схема определения осредненной скорости ветра по ширине потока представлена на рисунке 3.

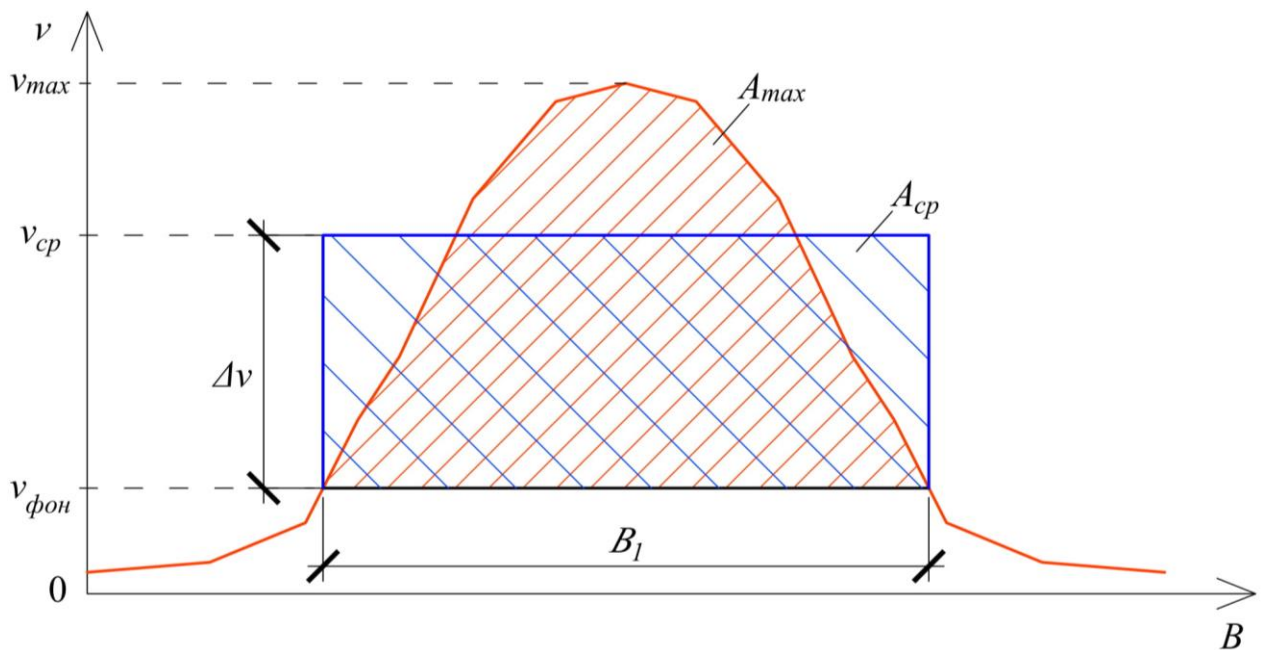


Рисунок 2.12 – Схема определения осредненной скорости ветра по ширине потока

Осреднение происходит в 5 этапов:

1. На графике скоростей ветра отмечается значение фоновой скорости ветра ($v_{фон}$) на высоте, на которой снят этот график;
2. Определяется ширина B_1 , соответствующая длине отрезка, образующегося при пересечении искомого графика и линии $v_{фон}$;
3. Определяется площадь графика A_{max} над линией $v_{фон}$;
4. Значение A_{max} делится на значение ширины B_1 , в результате чего получается значение Δv – высоты прямоугольника с площадью A_{cp} равной площади A_{max} ;
5. К значению $v_{фон}$ прибавляется значение Δv , таким образом получается значение осредненной скорости v_{cp} .

Формула для вычисления осредненной скорости ветра по потоку выглядит следующим образом:

$$v_{cp} = v_{фон} + \frac{A_{max}}{B_1}. \quad (2.9)$$

Полученные значения средних скоростей трансформированного потока занесены в таблицы 2.3 – 2.8.

Таблица 2.3 – Значения осредненных и максимальных по ширине потока значений скорости ветра при ширине разрыва $S = 10$ м

$z_e, \text{ м}$	Значения v_{cp} и v_{max} при различных значениях d_w										$v_0, \text{ м/с}$
	$d_w = 20 \text{ м}$		$d_w = 30 \text{ м}$		$d_w = 40 \text{ м}$		$d_w = 50 \text{ м}$		$d_w = 60 \text{ м}$		
	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	
5	28,9	37,5	26,7	35,1	26,8	35,1	27,2	35,7	26,0	33,2	14,04
10	33,0	38,8	30,7	35,2	27,9	36,1	27,3	34,7	25,0	31,7	16,7
20	32,9	39,0	30,9	37,5	29,4	36,3	28,5	33,1	27,7	33,2	19,86
40	34,3	39,0	32,8	37,3	31,8	37,0	29,6	34,7	28,2	31,5	23,62
60	35,2	39,4	33,7	38,1	32,5	36,2	30,5	32,6	28,4	30,2	26,14
80	36,0	39,8	34,2	37,7	32,0	33,1	30,9	33,0	29,6	30,2	28,09
100	36,0	39,2	34,3	36,8	31,8	33,3	-	27,4	-	25,1	29,7
150	39,6	42,2	37,0	38,7	34,0	35,0	-	30,2	-	27,1	32,87

Таблица 2.4 – Значения осредненных и максимальных по ширине потока значений скорости ветра при ширине разрыва $S = 20$ м

$z_e, \text{ м}$	Значения v_{cp} и v_{max} при различных значениях d_w										$v_0, \text{ м/с}$
	$d_w = 20 \text{ м}$		$d_w = 30 \text{ м}$		$d_w = 40 \text{ м}$		$d_w = 50 \text{ м}$		$d_w = 60 \text{ м}$		
	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	
5	30,7	39,7	29,0	40,0	28,8	37,8	27,9	36,6	27,5	37,2	14,04
10	35,4	42,0	35,2	42,8	33,7	42,3	32,6	40,2	32,1	39,4	16,7
20	36,3	40,5	36,0	42,3	35,4	42,4	34,9	42,0	33,8	41,7	19,86
40	37,3	41,4	37,0	42,7	36,0	42,7	34,8	41,6	34,4	41,0	23,62
60	37,5	41,6	37,2	42,2	36,9	42,8	36,1	42,2	35,1	40,4	26,14
80	38,2	42,1	38,0	42,6	37,8	42,9	35,9	39,9	34,8	38,1	28,09
100	39,3	42,7	38,7	42,7	38,0	42,3	36,3	41,4	35,6	39,3	29,7
150	41,4	44,4	40,0	43,6	38,8	42,9	36,4	41,3	36,6	40,2	32,87

Таблица 2.5 – Значения осредненных и максимальных по ширине потока значений скорости ветра при ширине разрыва $S = 30$ м

$z_e, \text{ м}$	Значения v_{cp} и v_{max} при различных значениях d_w										$v_0, \text{ м/с}$
	$d_w = 20 \text{ м}$		$d_w = 30 \text{ м}$		$d_w = 40 \text{ м}$		$d_w = 50 \text{ м}$		$d_w = 60 \text{ м}$		
	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	
5	33,6	40,8	31,6	40,4	30,8	40,2	29,5	37,9	27,8	39,2	14,04
10	35,7	41,8	34,4	40,8	34,0	41,0	33,3	42,3	32,6	41,1	16,7
20	34,8	38,2	33,8	37,5	33,5	38,1	33,5	38,8	33,3	39,5	19,86
40	36,9	40,3	34,8	39,2	34,1	39,6	34,3	39,7	34,3	40,4	23,62
60	37,9	40,9	35,3	39,5	35,5	39,7	35,2	40,0	34,3	39,5	26,14
80	39,6	41,7	35,5	39,0	34,5	38,2	35,3	38,9	34,5	39,4	28,09
100	40,9	43,1	37,8	40,7	34,5	36,9	35,0	38,0	34,0	37,7	29,7
150	42,0	44,4	41,2	43,9	39,9	42,8	38,3	40,8	37,4	38,3	32,87

Таблица 2.6 – Значения осредненных и максимальных по ширине потока значений скорости ветра при ширине разрыва $S = 40$ м

$z_e, \text{ м}$	Значения v_{cp} и v_{max} при различных значениях d_w										$v_0, \text{ м/с}$
	$d_w = 20 \text{ м}$		$d_w = 30 \text{ м}$		$d_w = 40 \text{ м}$		$d_w = 50 \text{ м}$		$d_w = 60 \text{ м}$		
	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	
5	34,0	49,5	29,5	39,9	32,8	39,7	31,4	39,3	30,6	38,5	14,04
10	35,0	38,6	34,3	39,7	33,4	38,5	32,3	38,1	31,7	37,7	16,7
20	34,1	36,1	33,6	36,2	33,3	36,8	33,2	37,3	33,2	37,9	19,86
40	36,4	38,9	36,9	38,7	35,0	38,3	34,3	38,2	34,0	38,4	23,62
60	38,9	41,5	38,8	41,9	38,8	41,8	37,0	40,7	35,9	40,2	26,14
80	40,2	42,6	41,0	43,7	39,7	43,6	38,7	43,1	38,0	42,4	28,09
100	40,8	43,0	42,0	44,6	41,6	44,9	40,5	44,7	39,4	43,3	29,7
150	42,0	44,9	42,9	45,3	42,6	46,0	42,4	46,4	42,1	45,9	32,87

Таблица 2.7 – Значения осредненных и максимальных по ширине потока значений скорости ветра при ширине разрыва $S = 50$ м

$z_e, \text{ м}$	Значения v_{cp} и v_{max} при различных значениях d_w										$v_0, \text{ м/с}$
	$d_w = 20 \text{ м}$		$d_w = 30 \text{ м}$		$d_w = 40 \text{ м}$		$d_w = 50 \text{ м}$		$d_w = 60 \text{ м}$		
	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	
5	34,3	40,2	34,3	42,0	33,3	41,3	31,8	41,3	29,8	41,3	14,04
10	35,7	40,5	35,8	40,6	35,2	39,9	34,4	40,3	34,3	40,5	16,7
20	35,8	40,0	35,4	40,0	36,0	40,5	35,6	40,6	35,8	40,6	19,86
40	38,0	40,7	39,2	41,8	38,8	42,3	37,9	41,9	37,3	41,8	23,62
60	38,6	41,3	40,6	44,4	40,0	43,5	38,8	42,3	37,5	41,7	26,14
80	38,6	40,4	40,8	43,8	41,8	44,7	40,8	44,0	38,8	42,5	28,09
100	38,9	40,2	40,4	43,0	42,0	45,0	41,7	44,2	40,4	43,6	29,7
150	41,1	42,4	40,6	41,7	40,2	42,3	40,4	43,3	41,0	44,0	32,87

Таблица 2.8 – Значения осредненных и максимальных по ширине потока значений скорости ветра при ширине разрыва $S = 60$ м

$z_e, \text{ м}$	Значения v_{cp} и v_{max} при различных значениях d_w										$v_0, \text{ м/с}$
	$d_w = 20 \text{ м}$		$d_w = 30 \text{ м}$		$d_w = 40 \text{ м}$		$d_w = 50 \text{ м}$		$d_w = 60 \text{ м}$		
	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	$v_{cp}, \text{ м/с}$	$v_{max}, \text{ м/с}$	
5	30,6	35,4	29,0	34,8	27,8	33,4	28,0	33,0	26,9	32,0	14,04
10	28,1	33,6	27,4	34,8	27,2	34,8	27,5	32,8	27,6	32,4	16,7
20	29,4	35,0	30,9	36,8	31,4	36,4	31,6	36,4	31,1	36,4	19,86
40	34,4	36,3	34,8	38,7	35,3	39,0	34,0	37,4	32,6	35,6	23,62
60	36,7	39,1	36,6	38,8	37,0	40,4	36,3	36,3	35,0	37,4	26,14
80	39,0	41,0	37,9	40,3	37,8	39,8	37,4	40,0	36,9	39,7	28,09
100	40,9	43,0	39,7	42,7	38,8	41,6	38,1	40,2	37,8	40,8	29,7
150	42,0	43,5	42,9	44,7	42,3	44,2	41,3	43,6	40,7	42,9	32,87

Также, значения эффективной ширины трансформированного воздушного потока B_l при различных значениях ширины разрыва S и d_w занесены в таблицы 2.9 – 2.14.

Таблица 2.9 – Значения эффективной ширины трансформированного воздушного потока B_l при ширине разрыва $S = 10$ м

$z_e, \text{ м}$	Значения эффективной ширины потока B_l при различных значениях d_w				
	$d_w = 20 \text{ м}$	$d_w = 30 \text{ м}$	$d_w = 40 \text{ м}$	$d_w = 50 \text{ м}$	$d_w = 60 \text{ м}$
5	12,92	16,46	20,56	25,6	30,53
10	12,28	14,64	16,14	17,62	19,82
20	9,09	9,91	10,6	11,97	13,75
40	7,57	7,99	8,95	9,14	10,4
60	6,32	6,58	6,96	7,19	5,0
80	5,91	5,81	5,81	6,43	4,44
100	5,03	4,71	3,67	-	-
150	5,22	4,37	2,54	-	-

Таблица 2.10 – Значения эффективной ширины трансформированного воздушного потока B_I при ширине разрыва $S = 20$ м

z_e , м	Значения эффективной ширины потока B_I при различных значениях d_w				
	$d_w = 20$ м	$d_w = 30$ м	$d_w = 40$ м	$d_w = 50$ м	$d_w = 60$ м
5	16,63	20,48	26,33	32,61	37,57
10	18,25	20,91	24,38	28,11	30,76
20	16,57	17,86	20,34	22,39	24,05
40	13,61	14,01	14,87	15,88	16,97
60	12,13	11,89	12,33	13,0	13,84
80	11,11	10,93	10,66	11,5	11,46
100	10,81	10,53	9,8	9,74	10,0
150	10,18	9,31	8,2	6,73	6,46

Таблица 2.11 – Значения эффективной ширины трансформированного воздушного потока B_I при ширине разрыва $S = 30$ м

z_e , м	Значения эффективной ширины потока B_I при различных значениях d_w				
	$d_w = 20$ м	$d_w = 30$ м	$d_w = 40$ м	$d_w = 50$ м	$d_w = 60$ м
5	28,15	33,24	38,38	46,83	59,3
10	25,95	30,23	33,34	36,78	40,35
20	24,45	26,32	28,47	30,62	32,9
40	21,35	21,52	20,75	20,85	22,95
60	19,51	19,55	15,98	15,47	17,07
80	18,68	18,28	11,97	11,34	12,19
100	17,82	18,56	13,75	11,51	11,08
150	15,83	15,2	14,87	13,83	11,92

Таблица 2.12 – Значения эффективной ширины трансформированного воздушного потока B_I при ширине разрыва $S = 40$ м

z_e , м	Значения эффективной ширины потока B_I при различных значениях d_w				
	$d_w = 20$ м	$d_w = 30$ м	$d_w = 40$ м	$d_w = 50$ м	$d_w = 60$ м
5	36,04	52,75	55,06	63,64	73,54
10	33,98	38,29	43,1	47,72	52,0
20	35,14	35,89	36,26	35,6	36,46
40	26,87	27,63	28,22	29,76	29,78
60	24,05	24,74	25,58	26,69	25,75
80	23,2	22,23	23,17	23,35	23,68
100	21,82	21,15	21,13	21,2	20,41
150	21,04	19,33	18,92	18,98	18,86

Таблица 2.13 – Значения эффективной ширины трансформированного воздушного потока B_I при ширине разрыва $S = 50$ м

z_e , м	Значения эффективной ширины потока B_I при различных значениях d_w				
	$d_w = 20$ м	$d_w = 30$ м	$d_w = 40$ м	$d_w = 50$ м	$d_w = 60$ м
5	37,64	41,92	49,42	55,17	64,8
10	36,19	40,42	45,22	48,69	50,7
20	37,83	40,23	43,48	47,23	50,44
40	33,27	34,4	36,1	35,97	36,27
60	30,0	30,09	32,72	34,55	33,19
80	29,46	26,83	28,92	31,18	33,41
100	29,54	25,2	25,6	27,57	28,35
150	27,87	25,89	22,68	19,31	18,16

Таблица 2.14 – Значения эффективной ширины трансформированного воздушного потока B_I при ширине разрыва $S = 60$ м

z_e , м	Значения эффективной ширины потока B_I при различных значениях d_w				
	$d_w = 20$ м	$d_w = 30$ м	$d_w = 40$ м	$d_w = 50$ м	$d_w = 60$ м
5	56,33	65,78	72,91	70,89	67,21
10	52,43	54,25	56,88	57,18	54,47
20	46,33	45,42	49,31	54,69	56,98
40	45,3	41,0	39,66	40,88	39,38
60	44,15	40,16	38,92	38,26	36,72
80	43,04	40,42	35,0	33,7	31,37
100	40,24	40,5	37,54	32,78	29,15
150	35,38	33,79	34,24	32,66	31,0

Таким образом, получены результаты первого этапа исследований. Дальнейший их анализ позволит получить более явную зависимость изменений скорости ветра от параметров S и d_w .

2.3. Анализ результатов численных экспериментов I-го этапа исследования

Прежде чем преобразовывать полученные значения скоростей в давления необходимо провести анализ полученных результатов. В первую очередь нужно проверить характер распределения по высоте. Так как функция распределения фоновой скорости ветра по высоте сохраняет постоянный рост с высотой (т.е. возрастает равномерно), а геометрические параметры зданий одинаковы по всей высоте, то предварительно можно сделать вывод о том, что функция распределения по высоте скоростей трансформированного воздушного потока должна обладать тем же свойством.

Для проверки этого условия необходимо построить графики полученных значений скоростей. Для этого используется программа Microsoft Office Excel.

В качестве примера на рисунке 2.13 представлен график значений скоростей ветра при ширине разрыва $S = 10$ м для различных d_w .

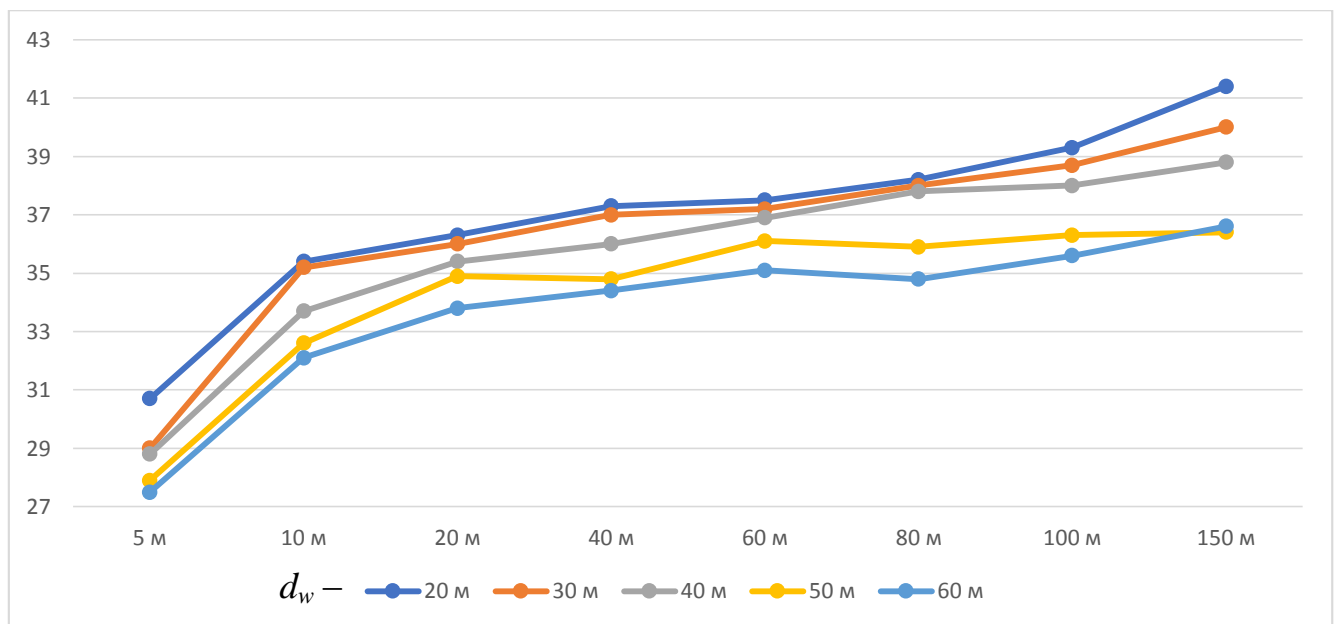


Рисунок 2.13 – График значений скоростей ветра при ширине разрыва $S = 10$ м для различных d_w

Как видно из рисунка 2.14, характер распределения скоростей по высоте растущий, но неравномерно, а значения скоростей ветра по мере отдаления от разрыва снижаются. Кроме того, интенсивность возрастания снизилась по

сравнению с фоновым ветром. Это связано со значительным увеличением скорости ветра вблизи поверхности земли.

Так как свойство равномерного роста значений скорости с высотой не наблюдается, хотя и должно иметь место, можно сделать вывод о том, что существующая погрешность измерений дает о себе знать. Для дальнейших изысканий необходимо привести полученные результаты к идеальной картине распределения. Для этого, средствами Excel выделяются линии тренда для каждого графика, представляющие собой график аппроксимированной функции по значениям графика скоростей. На рисунке 2.14 представлен пример графика с построенной логарифмической линией тренда и аппроксимированной функцией.

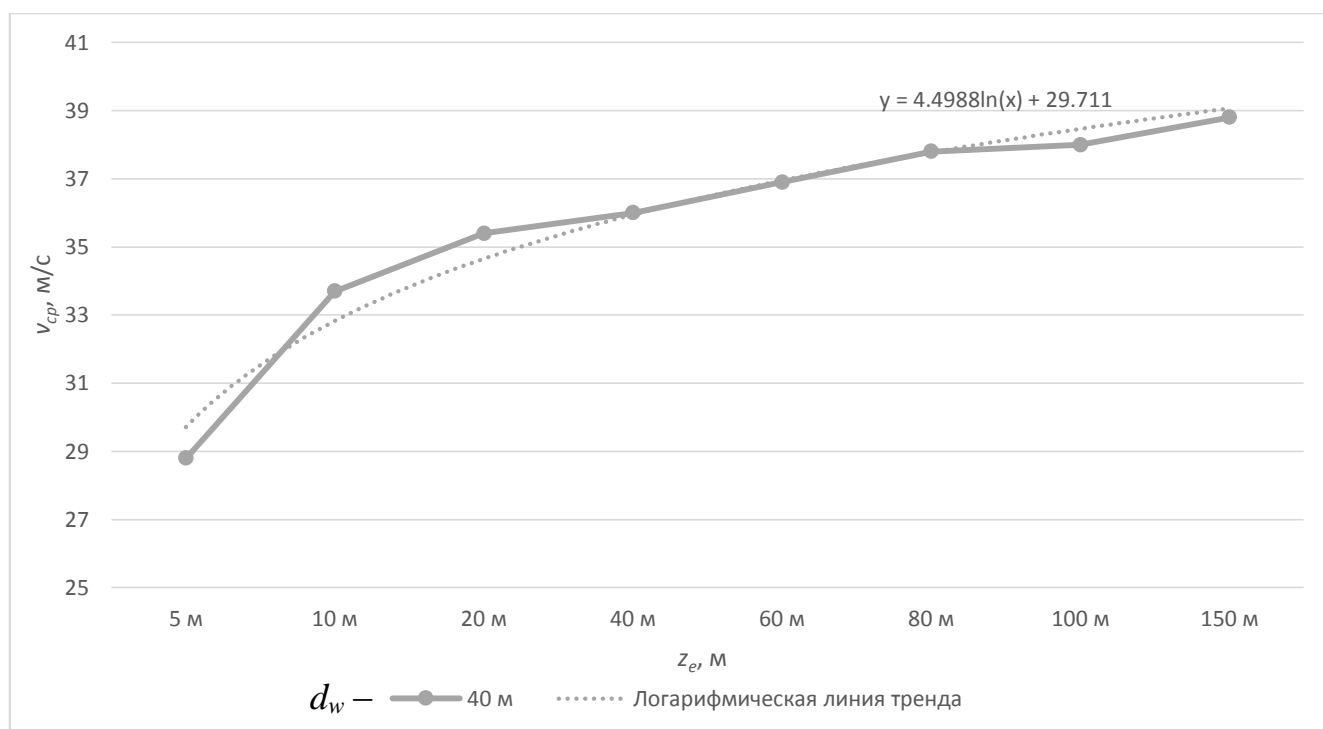


Рисунок 2.14 – График значений скоростей ветра при ширине разрыва $S = 10$ м и $d_w = 40$ м с построенной линией тренда

Функция линии тренда, представленная на графике, зависит от « x », принимающего значения от 1 до 8 (количество характерных высот z_e).

На рисунках 2.15 – 2.20 представлены графики распределения скоростей ветра по высоте, приведенные к идеальной картине при помощи линий тренда.

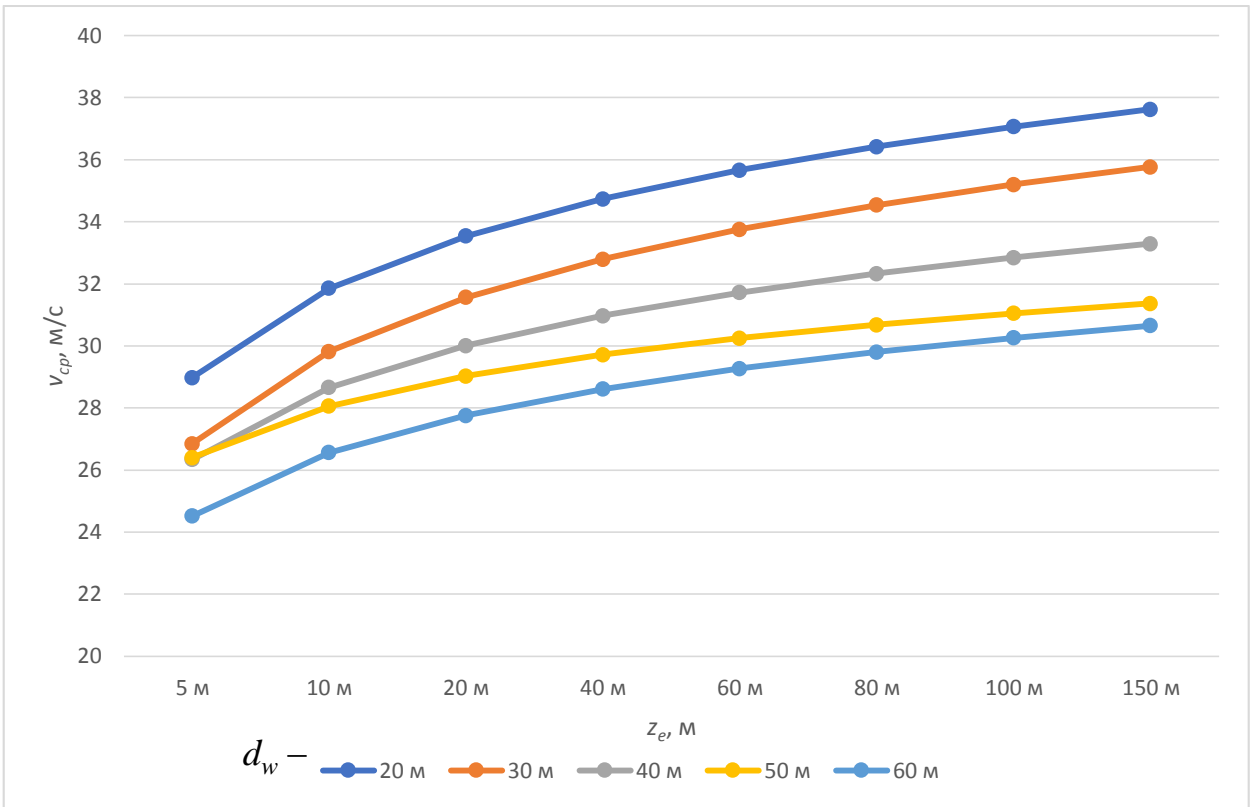


Рисунок 2.15 – Графики аппроксимированной функции распределения значений скоростей ветра по высоте при ширине разрыва $S = 10$ м для различных d_w

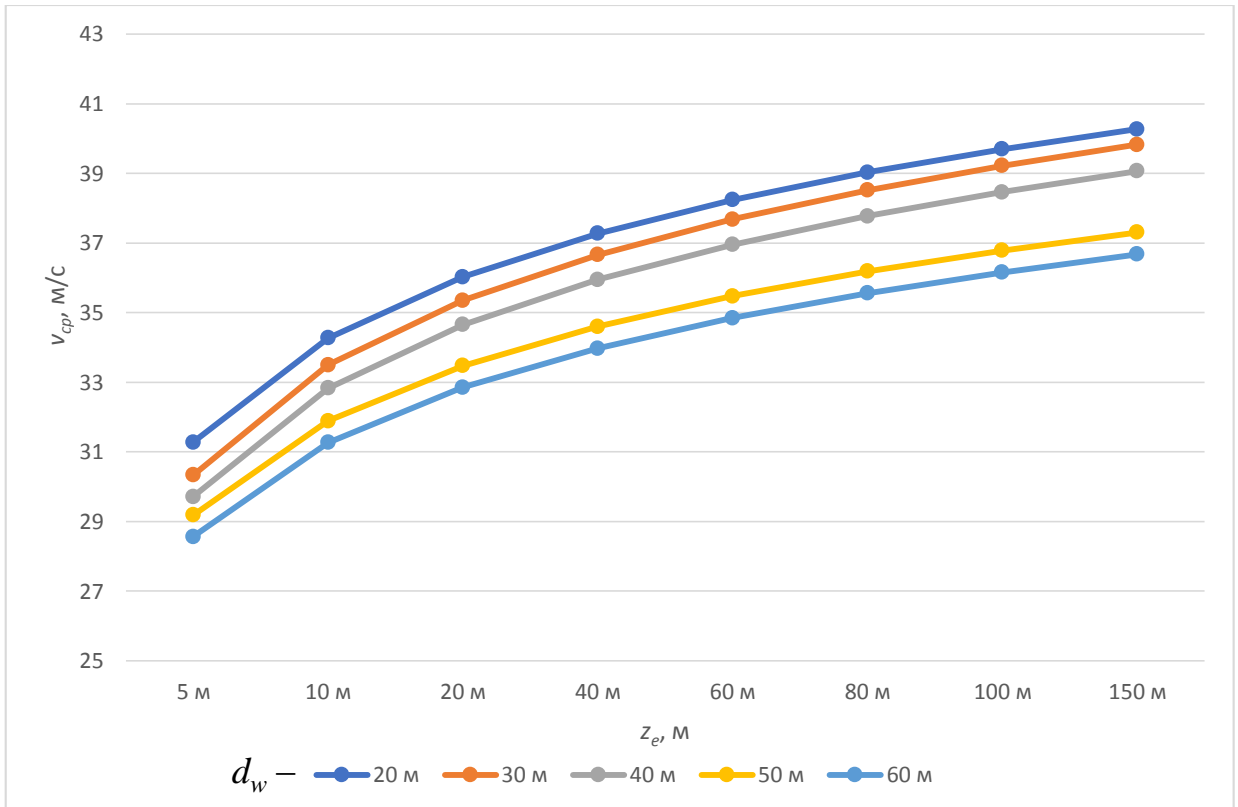


Рисунок 2.16 – Графики аппроксимированной функции распределения значений скоростей ветра по высоте при ширине разрыва $S = 20$ м для различных d_w

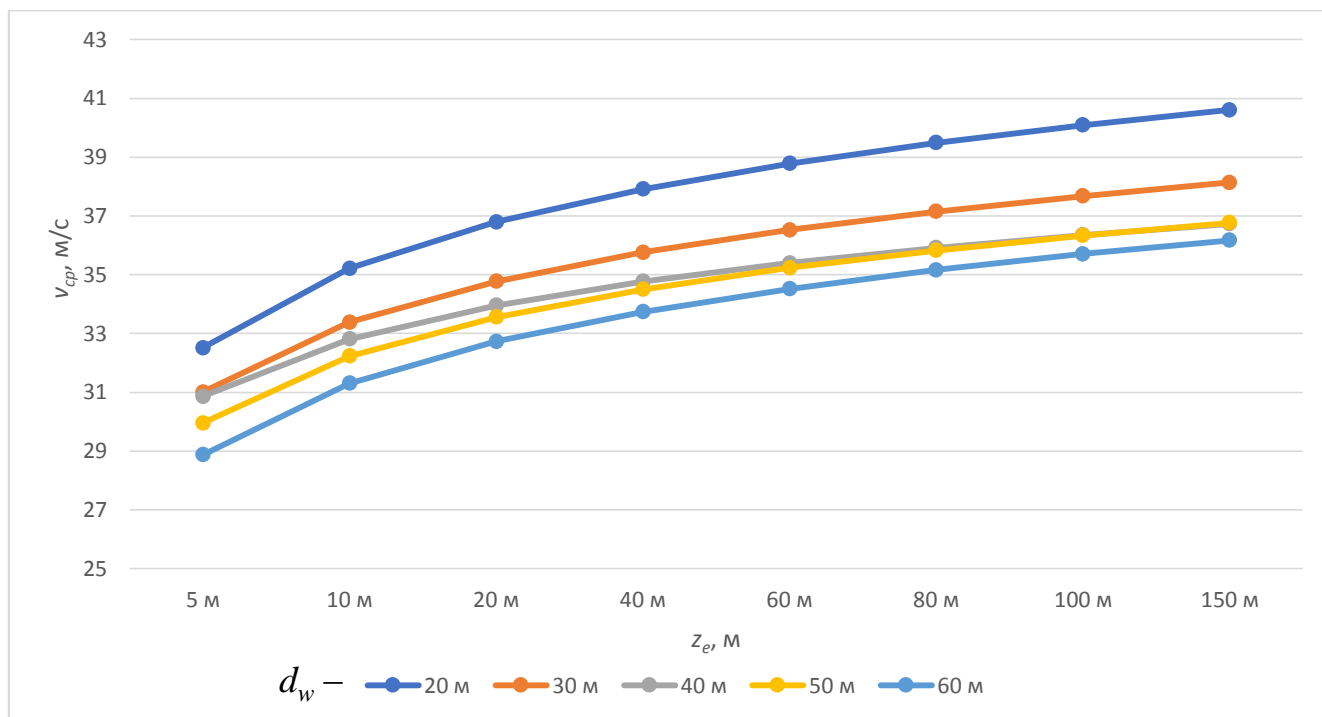


Рисунок 2.17 – Графики аппроксимированной функции распределения значений скоростей ветра по высоте при ширине разрыва $S = 30$ м для различных d_w

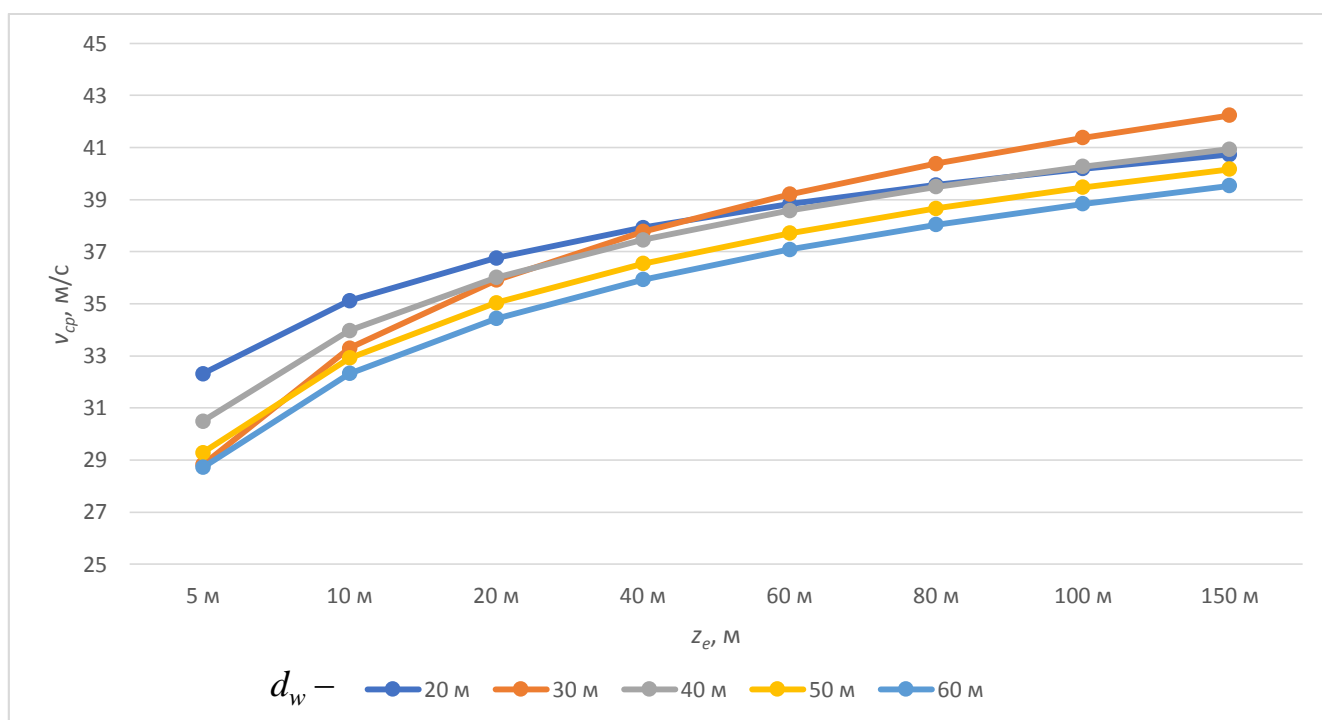


Рисунок 2.18 – Графики аппроксимированной функции распределения значений скоростей ветра по высоте при ширине разрыва $S = 40$ м для различных d_w

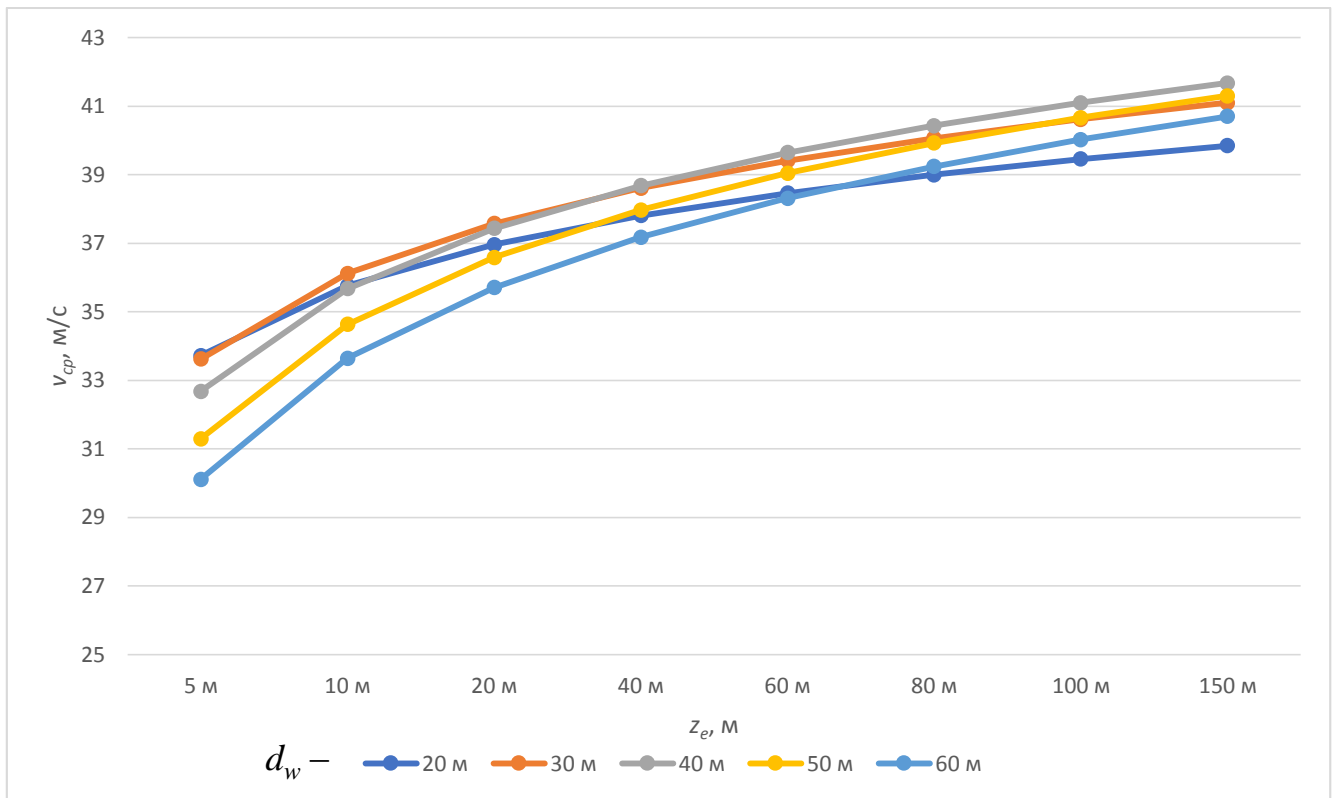


Рисунок 2.19 – Графики аппроксимированной функции распределения значений скоростей ветра по высоте при ширине разрыва $S = 50$ м для различных d_w

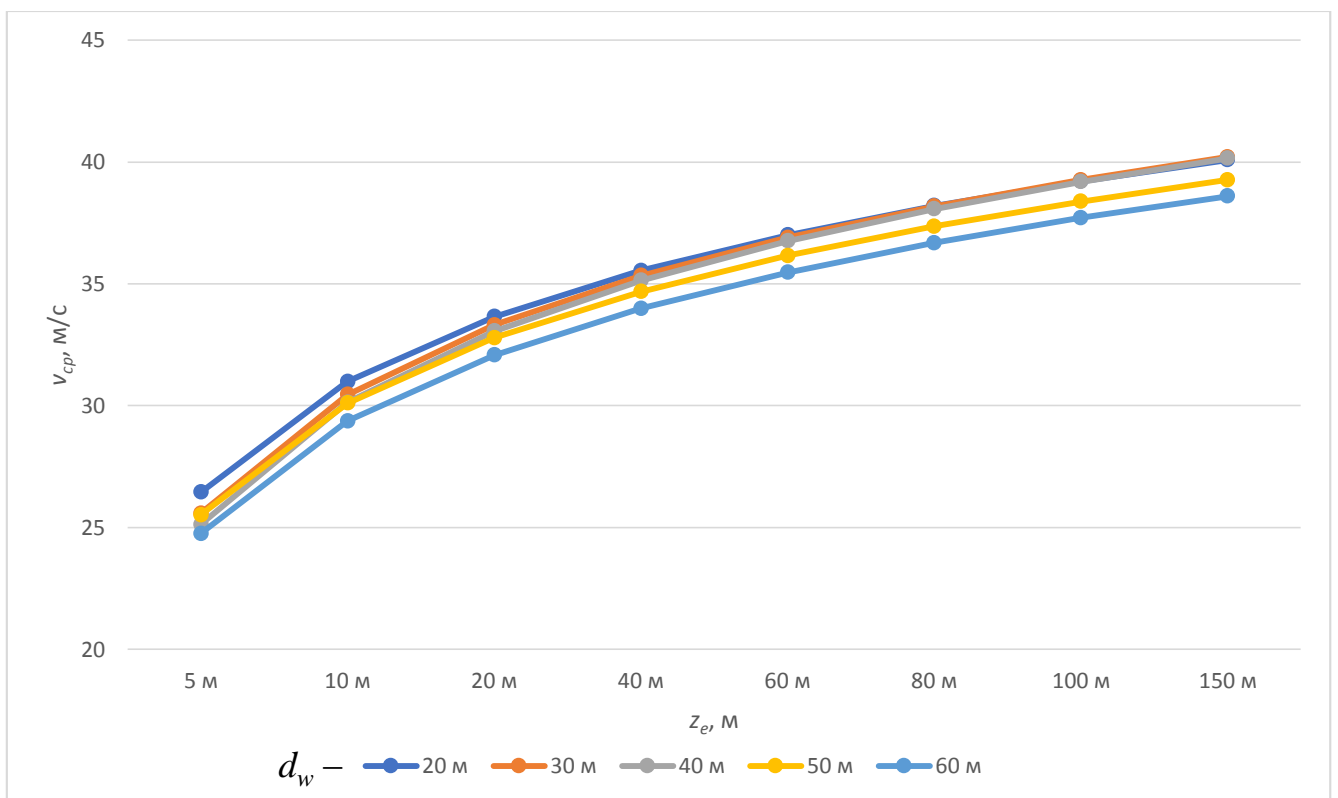


Рисунок 2.20 – Графики аппроксимированной функции распределения значений скоростей ветра по высоте при ширине разрыва $S = 60$ м для различных d_w

Также, необходимо исследовать зависимость значений скорости от расстояния d_w , для чего средствами Excel строятся графики по значениям v_{cp} при различных d_w . Пример такого графика для высоты представлен на рисунке 2.21.

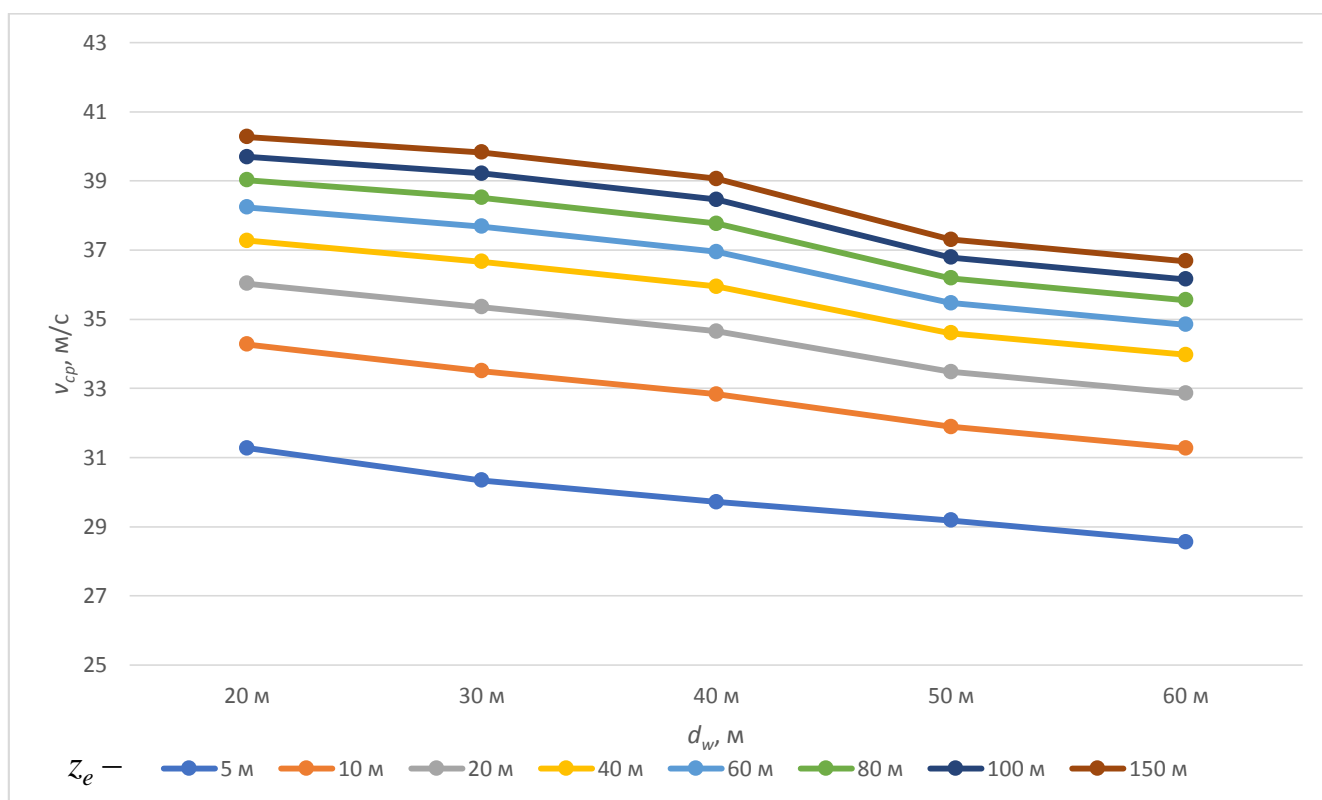


Рисунок 2.21 – Графики распределения значений скоростей ветра на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 20$ м

Как видно из рисунка 9, распределение значений средних скоростей трансформированного воздушного потока в зависимости от расстояния d_w близко к линейному. Подобная картина наблюдается при всех S . Наблюдаемые отклонения в достаточной степени не влияют на общую картину распределения. Таким образом, можно сделать вывод о линейном уменьшении скорости с увеличением расстояния d_w .

Для приведения полученной картины распределения необходимо воспользоваться линией тренда, только в данном случае линейным преобразованием. Пример такого графика для разрыва шириной $S = 20$ м приведен на рисунке 2.22.

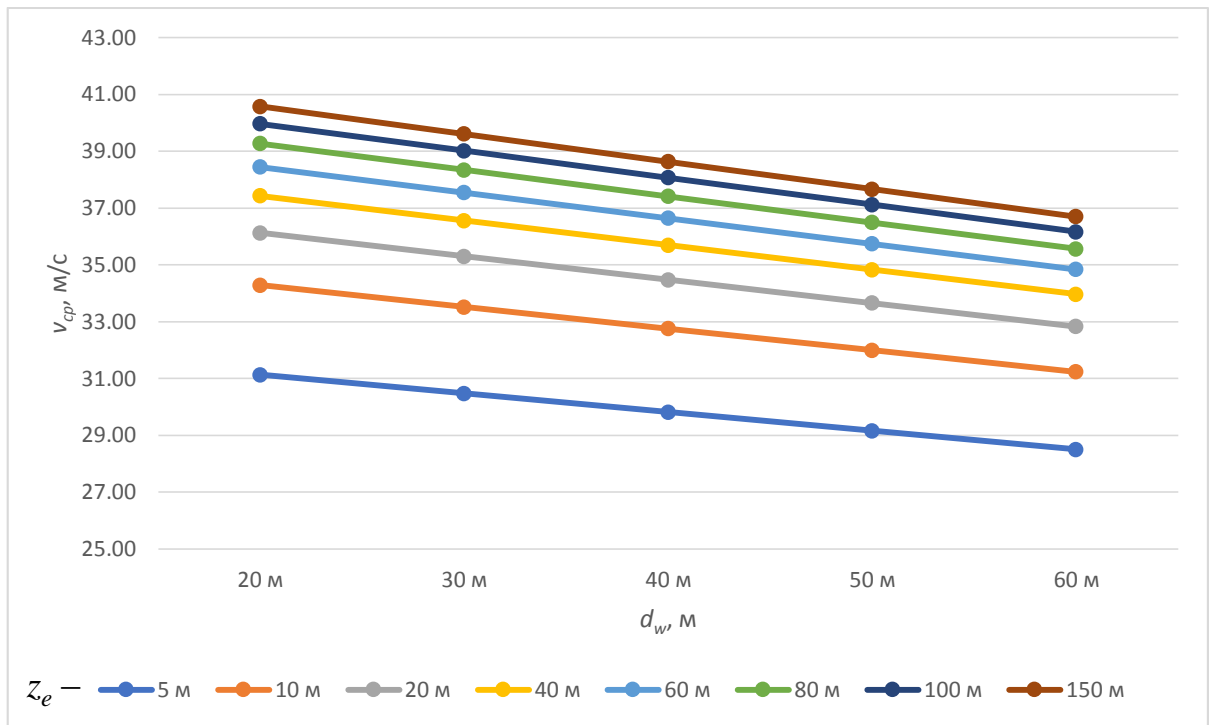


Рисунок 2.22 – Графики распределения значений скоростей ветра на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 20$ м, приведенного к линейной зависимости

При этом характер распределения скоростей по высоте остается неизменным и представляет собой логарифмический профиль (рисунок 2.23).

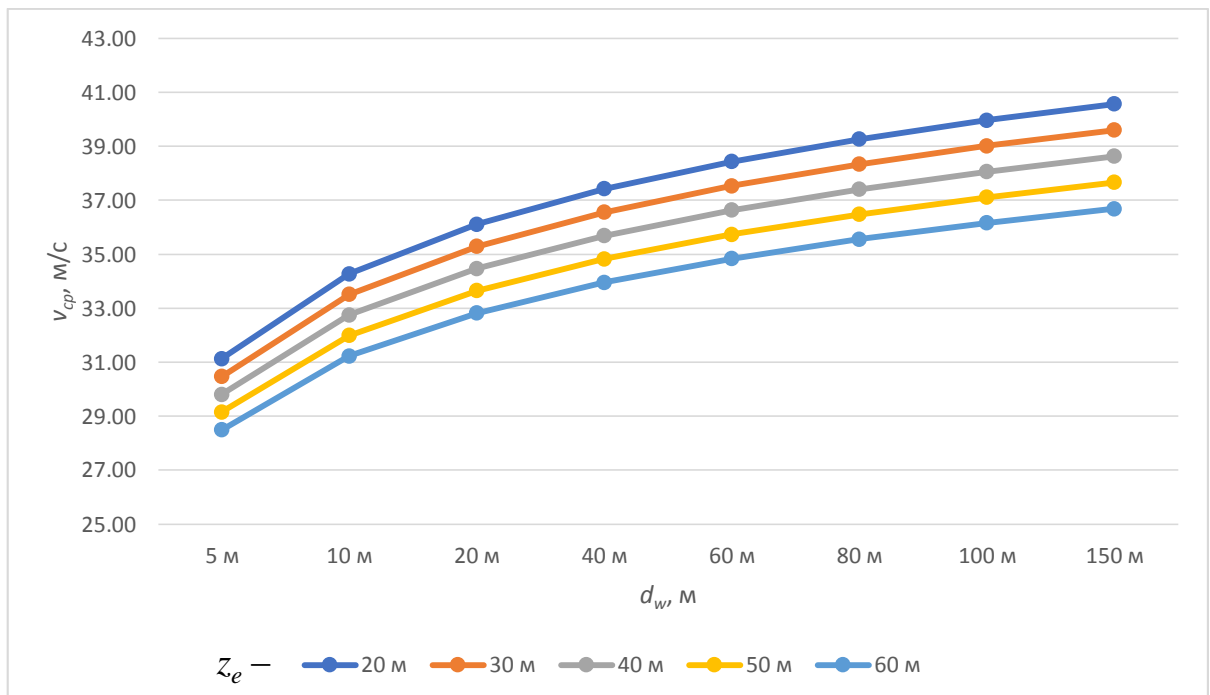


Рисунок 2.23 – Графики распределения значений скоростей ветра в зависимости от высоты для различных d_w при ширине разрыва $S = 20$ м

Таким образом, строятся графики для всех значений ширины разрыва S (рисунки 2.24 – 2.28).

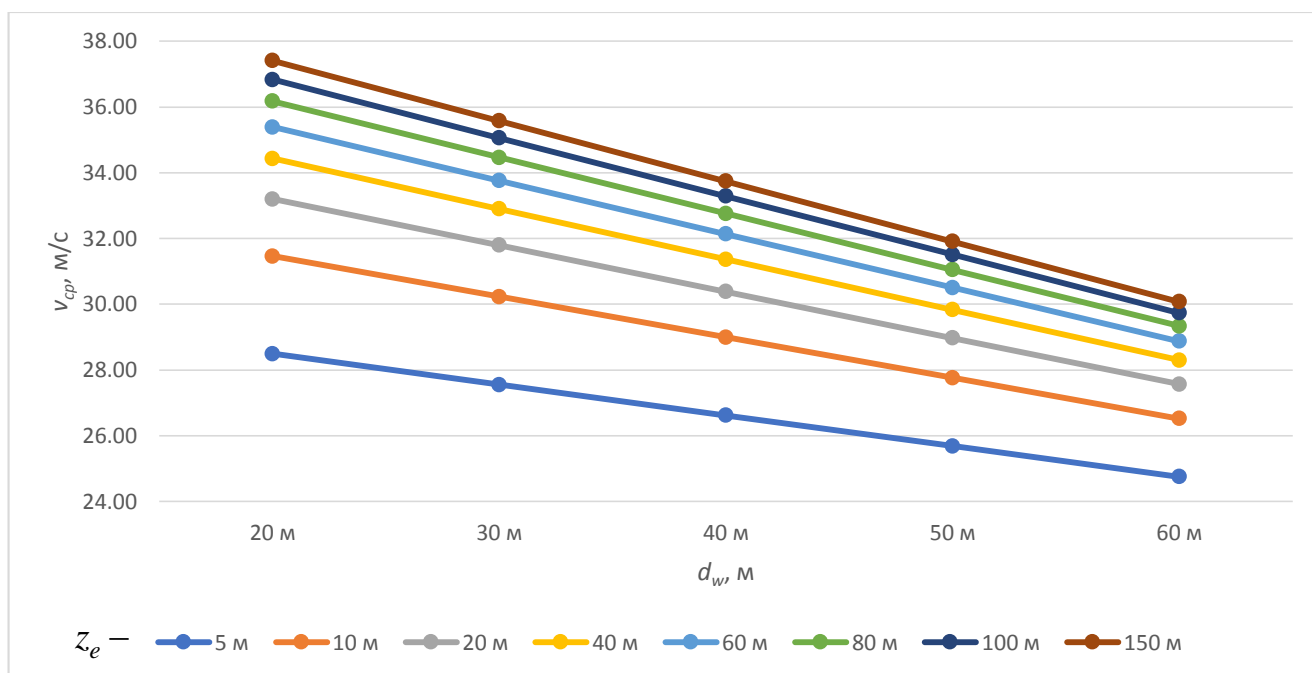


Рисунок 2.24 – Графики распределения значений скоростей ветра на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 10$ м, приведенного к линейной зависимости

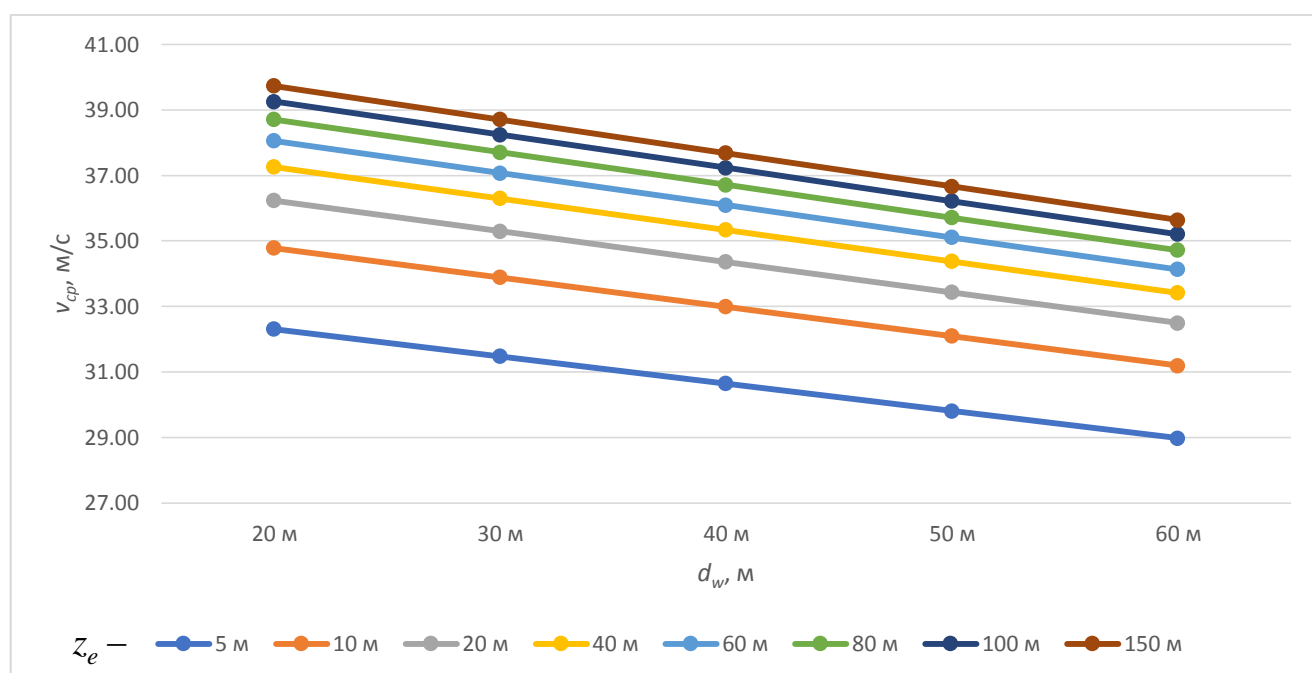


Рисунок 2.25 – Графики распределения значений скоростей ветра на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 30$ м, приведенного к линейной зависимости

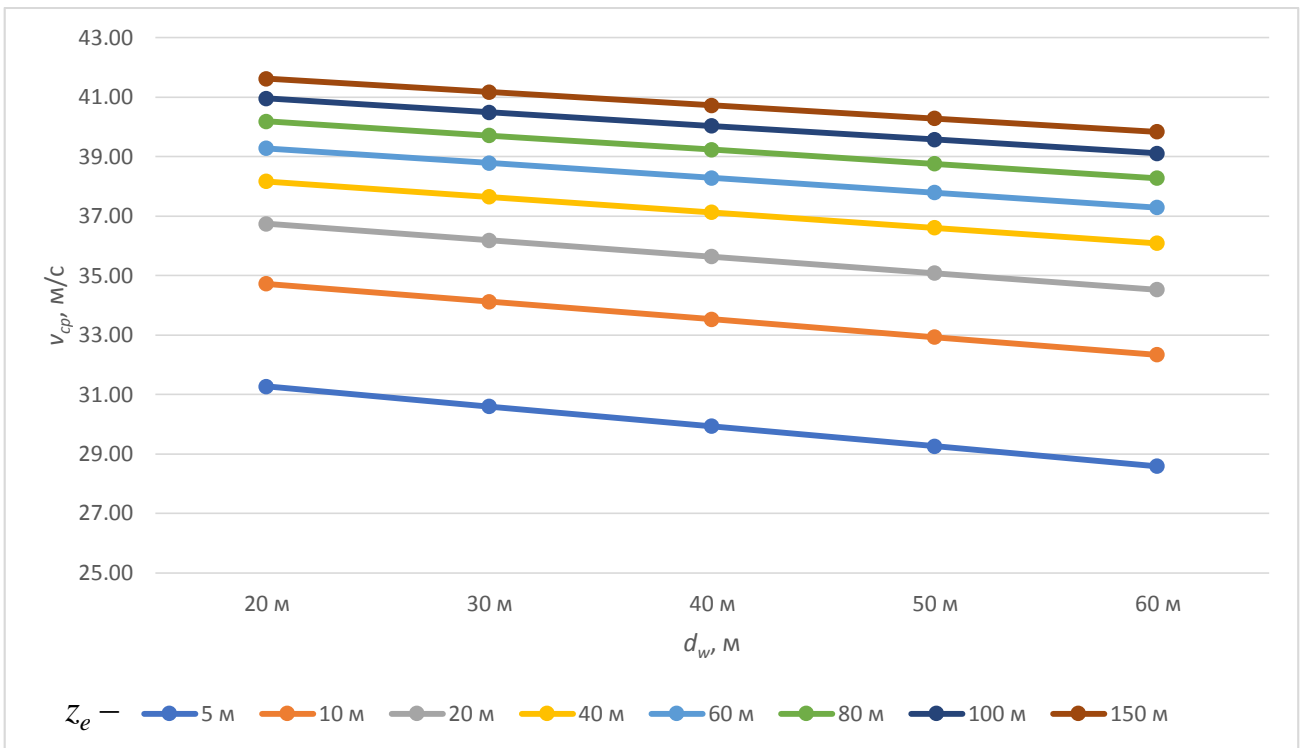


Рисунок 2.26 – Графики распределения значений скоростей ветра на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 40$ м, приведенного к линейной зависимости

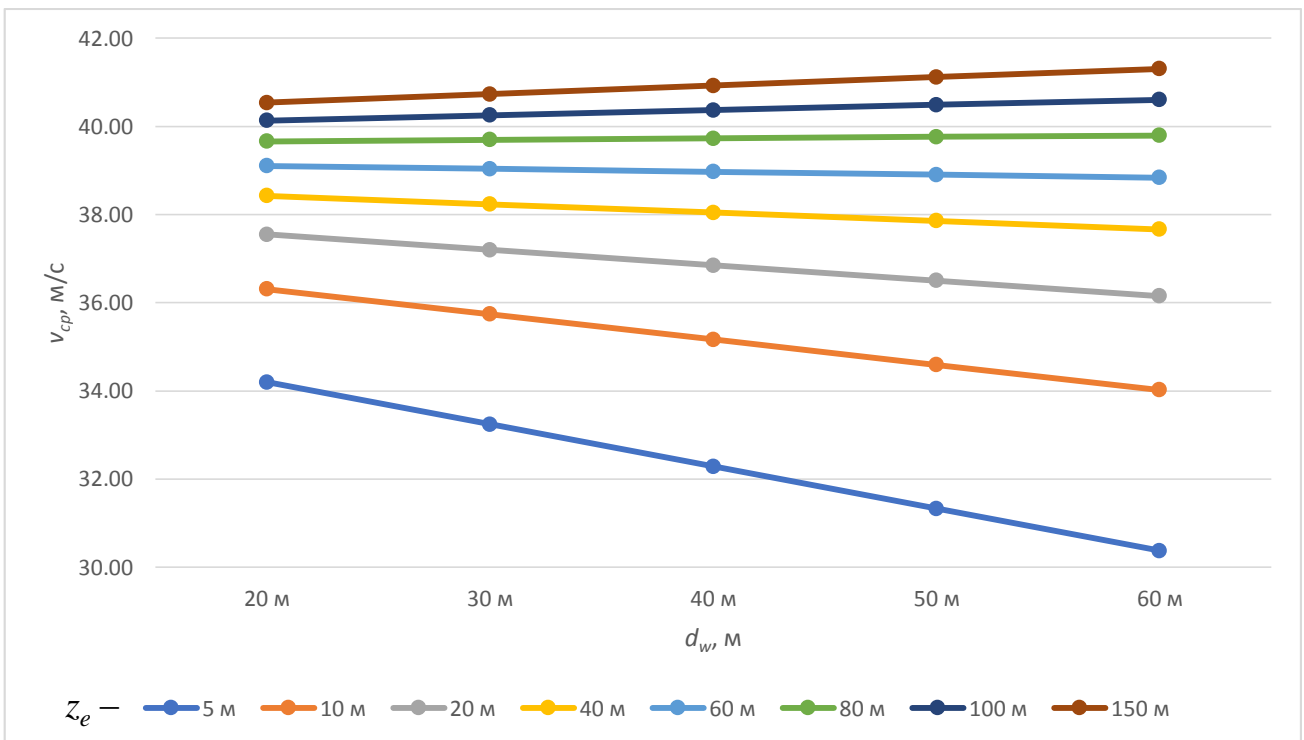


Рисунок 2.27 – Графики распределения значений скоростей ветра на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 50$ м, приведенного к линейной зависимости

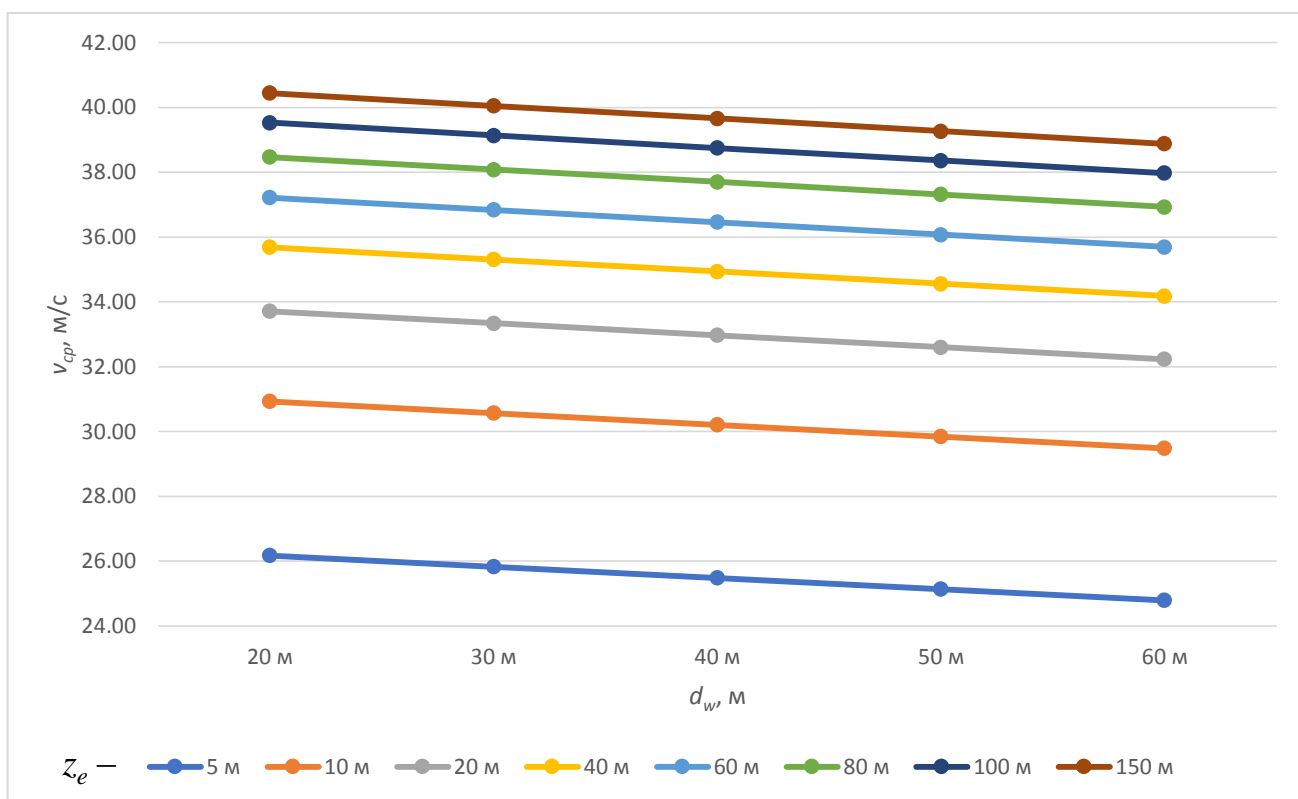


Рисунок 2.28 – Графики распределения значений скоростей ветра на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 60$ м, приведенного к линейной зависимости

Полученные значения скоростей занесены в таблицы 2.15 – 2.20. Для наглядности ячейки в таблицах выделены цветом в соответствии с величиной скорости – красным цветом выделены максимальные значения, зеленым – минимальные.

Таблица 2.15 – Значения осредненных по ширине скоростей трансформированного воздушного потока на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 10$ м

z_e , м	Значения v_{cp} при различных значениях d_w					v_0 , м/с
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м	
5 м	28,49	27,55	26,62	25,68	24,75	14,04
10 м	31,46	30,23	28,99	27,76	26,53	16,7
20 м	33,20	31,79	30,38	28,97	27,56	19,86
40 м	34,44	32,90	31,37	29,84	28,30	23,62
60 м	35,39	33,76	32,13	30,50	28,87	26,14
80 м	36,17	34,47	32,76	31,05	29,34	28,09
100 м	36,84	35,06	33,29	31,51	29,74	29,7
150 м	37,41	35,58	33,74	31,91	30,08	32,87

Таблица 2.16 – Значения осредненных по ширине скоростей трансформированного воздушного потока на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 20$ м

z_e , м	Значения v_{cp} при различных значениях d_w					v_0 , м/с
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м	
5 м	31,13	30,47	29,81	29,16	28,50	14,04
10 м	34,28	33,52	32,75	31,99	31,23	16,7
20 м	36,12	35,30	34,47	33,65	32,83	19,86
40 м	37,43	36,56	35,69	34,83	33,96	23,62
60 м	38,44	37,54	36,64	35,74	34,84	26,14
80 м	39,27	38,34	37,41	36,48	35,56	28,09
100 м	39,97	39,02	38,07	37,12	36,16	29,7
150 м	40,57	39,60	38,63	37,66	36,69	32,87

Таблица 2.17 – Значения осредненных по ширине скоростей трансформированного воздушного потока на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 30$ м

z_e , м	Значения v_{cp} при различных значениях d_w					v_0 , м/с
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м	
5 м	32,31	31,48	30,64	29,81	28,97	14,04
10 м	34,78	33,89	32,99	32,09	31,19	16,7
20 м	36,23	35,30	34,36	33,43	32,49	19,86
40 м	37,26	36,30	35,34	34,38	33,41	23,62
60 м	38,05	37,07	36,09	35,11	34,13	26,14
80 м	38,70	37,71	36,71	35,71	34,71	28,09
100 м	39,25	38,24	37,23	36,22	35,21	29,7
150 м	39,73	38,71	37,68	36,66	35,64	32,87

Таблица 2.18 – Значения осредненных по ширине скоростей трансформированного воздушного потока на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 40$ м

z_e , м	Значения v_{cp} при различных значениях d_w					v_0 , м/с
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м	
5 м	31,27	30,60	29,93	29,25	28,58	14,04
10 м	34,72	34,12	33,52	32,93	32,33	16,7
20 м	36,73	36,18	35,63	35,08	34,53	19,86
40 м	38,17	37,64	37,12	36,60	36,08	23,62
60 м	39,27	38,78	38,28	37,78	37,29	26,14
80 м	40,18	39,71	39,23	38,75	38,27	28,09
100 м	40,95	40,49	40,03	39,57	39,11	29,7
150 м	41,61	41,17	40,72	40,28	39,83	32,87

Таблица 2.19 – Значения осредненных по ширине скоростей трансформированного воздушного потока на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 50$ м

$z_e, \text{ м}$	Значения v_{cp} при различных значениях d_w					$v_0, \text{ м/с}$
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м	
5 м	34,19	33,24	32,28	31,33	30,37	14,04
10 м	36,31	35,74	35,16	34,59	34,02	16,7
20 м	37,55	37,20	36,85	36,50	36,15	19,86
40 м	38,43	38,24	38,05	37,86	37,67	23,62
60 м	39,11	39,04	38,97	38,91	38,84	26,14
80 м	39,66	39,70	39,73	39,76	39,80	28,09
100 м	40,13	40,25	40,37	40,49	40,61	29,7
150 м	40,54	40,73	40,93	41,12	41,31	32,87

Таблица 2.20 – Значения осредненных по ширине скоростей трансформированного воздушного потока на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 60$ м

$z_e, \text{ м}$	Значения v_{cp} при различных значениях d_w					$v_0, \text{ м/с}$
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м	
5 м	26,17	25,83	25,48	25,13	24,79	14,04
10 м	30,93	30,57	30,21	29,84	29,48	16,7
20 м	33,71	33,34	32,97	32,60	32,23	19,86
40 м	35,68	35,31	34,93	34,56	34,18	23,62
60 м	37,22	36,83	36,45	36,07	35,69	26,14
80 м	38,47	38,08	37,70	37,31	36,93	28,09
100 м	39,52	39,14	38,75	38,36	37,97	29,7
150 м	40,44	40,05	39,66	39,27	38,88	32,87

Для проверки достоверности аппроксимации значений необходимо вычислить среднюю ошибку аппроксимации по каждой таблице, которая вычисляется по формуле:

$$\bar{A} = \frac{\sum |v_{cp, i} - v_{cp, \text{анпр}, i}| / v_{cp, i}}{n} \times 100\%, \quad (2.10)$$

где, $v_{cp, i}$ – значение средней скорости, полученное по результатам эксперимента;
 $v_{cp, \text{анпр}, i}$ – значение средней скорости, рассчитанное по аппроксимированному уравнению;

$n = 5$ – количество рассматриваемых значений в строке (по количеству d_w).

Полученные значения средних ошибок аппроксимаций по каждому графику занесены в таблицу 2.21.

Таблица 2.21 – Значения средних ошибок аппроксимации

$z_e, \text{ м}$	Значения средних ошибок аппроксимаций, %					
	$S = 10 \text{ м}$	$S = 20 \text{ м}$	$S = 30 \text{ м}$	$S = 40 \text{ м}$	$S = 50 \text{ м}$	$S = 60 \text{ м}$
5 м	3,24	3,49	2,00	7,26	2,01	11,65
10 м	3,52	3,18	3,10	1,11	0,67	8,74
20 м	1,82	2,37	2,68	6,01	3,05	6,29
40 м	0,65	0,75	2,29	4,88	1,34	2,46
60 м	0,71	1,16	1,51	1,63	2,33	1,22
80 м	0,99	1,67	3,19	1,07	3,16	0,49
100 м	2,95	1,28	3,90	2,23	2,20	1,24
150 м	4,58	1,41	5,49	4,15	1,19	5,50

Значение средней ошибки аппроксимации менее 15% свидетельствует о качественном подборе уравнения тренда. Как видно из таблицы 19, максимальное значение средней ошибки составляет 11,65%, что удовлетворяет условию достоверности подбора.

Также, достоверность подбора уравнения тренда можно определить при помощи величины достоверности аппроксимации R^2 . Эта величина вычисляется автоматически при построении линии тренда и показывает степень соответствия трендовой модели исходным данным. Его значение может лежать в диапазоне от 0 до 1. Чем ближе R^2 к 1, тем точнее модель описывает имеющиеся данные [25].

Минимальное значение R^2 среди всех подобранных линий тренда составляет 0,7433, что говорит о высокой степени соответствия.

Таким же образом необходимо аппроксимировать значения эффективной ширины потока. Полученные в результате аппроксимации значения приведены в таблицах 2.22 – 2.27.

Таблица 2.22 – Аппроксимированные значения эффективной ширины потока B_l на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 10 \text{ м}$

$z_e, \text{ м}$	Значения B_l при различных значениях d_w				
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м
5 м	13,28	17,47	21,67	25,86	30,06
10 м	10,59	12,89	15,20	17,50	19,81
20 м	9,01	10,21	11,41	12,61	13,82
40 м	7,90	8,31	8,73	9,15	9,56
60 м	7,03	6,84	6,65	6,45	6,26
80 м	6,32	5,63	4,94	4,26	3,57
100 м	5,73	4,62	3,51	2,40	1,29
150 м	5,04	3,73	2,43	1,12	0,00

Таблица 2.23 – Аппроксимированные значения эффективной ширины потока B_l на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 20$ м

z_e , м	Значения B_l при различных значениях d_w				
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м
5 м	18,26	23,55	28,84	34,13	39,42
10 м	15,71	18,94	22,17	25,39	28,62
20 м	14,22	16,24	18,26	20,29	22,31
40 м	13,16	14,33	15,50	16,66	17,83
60 м	12,34	12,85	13,35	13,85	14,35
80 м	11,68	11,63	11,59	11,55	11,51
100 м	11,11	10,61	10,11	9,61	9,11
150 м	10,62	9,72	8,83	7,93	7,03

Таблица 2.24 – Аппроксимированные значения эффективной ширины потока B_l на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 30$ м

z_e , м	Значения B_l при различных значениях d_w				
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м
5 м	27,95	35,00	42,04	49,09	56,13
10 м	24,46	28,32	32,18	36,04	39,90
20 м	22,41	24,41	26,41	28,41	30,41
40 м	20,96	21,64	22,31	22,99	23,67
60 м	19,84	19,49	19,14	18,79	18,44
80 м	18,92	17,73	16,55	15,36	14,17
100 м	18,14	16,25	14,35	12,46	10,56
150 м	17,47	14,96	12,45	9,94	7,44

Таблица 2.25 – Аппроксимированные значения эффективной ширины потока B_l на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 40$ м

z_e , м	Значения B_l при различных значениях d_w				
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м
5 м	40,78	48,12	55,45	62,79	70,13
10 м	34,12	38,54	42,97	47,39	51,82
20 м	30,22	32,94	35,66	38,39	41,11
40 м	27,45	28,97	30,48	32,00	33,51
60 м	25,31	25,88	26,46	27,04	27,62
80 м	23,55	23,37	23,18	22,99	22,81
100 м	22,07	21,24	20,40	19,57	18,73
150 м	20,79	19,39	18,00	16,60	15,21

Таблица 2.26 – Аппроксимированные значения эффективной ширины потока B_l на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 50$ м

$z_e, \text{ м}$	Значения B_l при различных значениях d_w				
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м
5 м	39,17	45,95	52,73	59,51	66,29
10 м	35,48	39,64	43,80	47,96	52,12
20 м	33,32	35,94	38,57	41,20	43,83
40 м	31,78	33,32	34,87	36,41	37,95
60 м	30,59	31,29	31,99	32,69	33,39
80 м	29,62	29,63	29,64	29,65	29,66
100 м	28,80	28,23	27,66	27,08	26,51
150 м	28,09	27,01	25,93	24,86	23,78

Таблица 2.27 – Аппроксимированные значения эффективной ширины потока B_l на различных высотах в зависимости от расстояния d_w при ширине разрыва $S = 60$ м

$z_e, \text{ м}$	Значения B_l при различных значениях d_w				
	20 м	30 м	40 м	50 м	60 м
5 м	60,18	63,30	66,41	69,52	72,64
10 м	52,64	53,90	55,17	56,43	57,69
20 м	48,23	48,41	48,59	48,77	48,95
40 м	45,10	44,51	43,92	43,34	42,75
60 м	42,67	41,49	40,30	39,12	37,94
80 м	40,69	39,02	37,35	35,68	34,01
100 м	39,01	36,93	34,85	32,76	30,68
150 м	37,56	35,12	32,68	30,24	27,80

Цветовое условное форматирование ячеек таблиц наглядно отражает неравномерное распределение значений эффективной ширины потока B_l . Внизу, с увеличением расстояния d_w ширина потока возрастает, а наверху снижается. При этом, можно сказать, что в средней части поток примерно равен по ширине на всем пути. Этот эффект возникает из-за неравномерности распределения скоростей по высоте.

Давления от трансформированного воздушного потока действуют только по эффективной ширине потока B_l . При этом, на фасад действует также нормативное ветровое давление w_0 , поскольку расчет осредненных по ширине потока значений скорости ветра производился с учетом величины скорости набегающего потока за пределами эффективной ширины потока B_l . Это иллюстрирует приведенная на рисунке 2.29 схема ветрового воздействия от трансформированного воздушного потока.

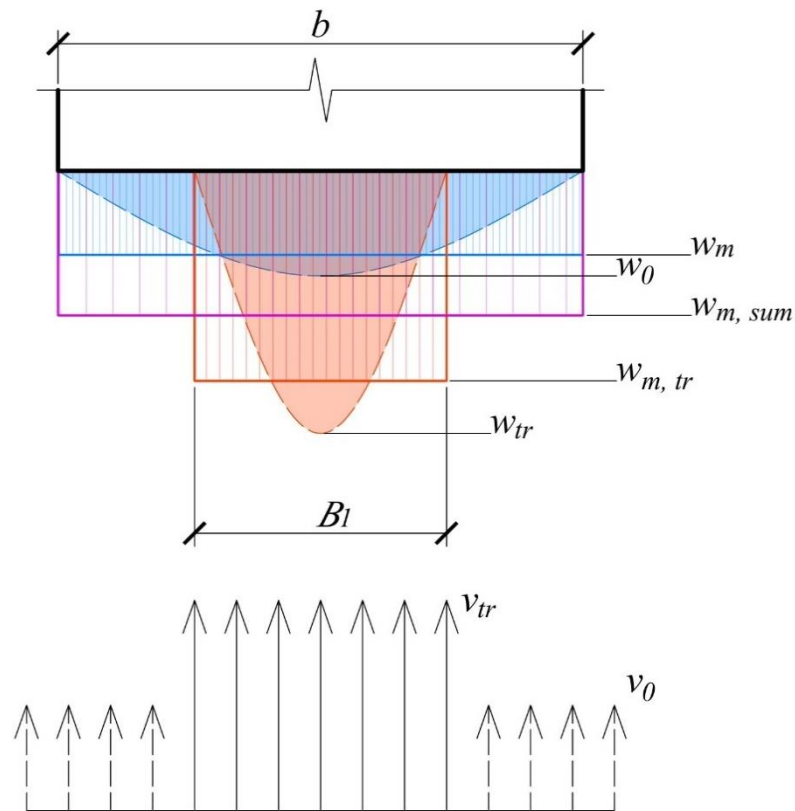


Рисунок 2.29 – Схема полного ветрового воздействия от трансформированного воздушного потока

Как видно из рисунка 2.29, при $b > B_l$ полное ветровое давление на здание $w_{m, sum}$ (выделено фиолетовым) определяется как сумма нормативного ветрового давления w_m (выделено синим) и ветрового давления от трансформированного воздушного потока $w_{m,tr}$ (выделено красным) шириной B_l с учетом аэродинамического коэффициента $c = 0,8$. Предварительно, формула для вычисления $w_{m, sum}$ на конкретной высоте z_e выглядит следующим образом:

$$w_{m, sum}(z_e) = \frac{w_m(z_e) \times b + (w_{m,tr}(z_e) - w_m(z_e)) \times B_l}{b}, \quad (2.11)$$

или более развернуто:

$$w_{m, sum} = \frac{w_0 \times k(z_e) \times c \times b + ((v_{tr}(z_e))^2 \times 0,43 - w_0 \times k(z_e)) \times c \times B_l}{b}. \quad (2.12)$$

Все значения, необходимые для расчета по формуле (2.12) определяются по таблицам 2.15 – 2.20, 2.22 – 2.27 и по таблице 11.2 СП 20.13330.2016. При этом v_{tr} равно v_{cp} из таблиц 2.15 – 2.20 [7].

При $b \leq B_l$ не учитывается нормативное ветровое давление w_0 , рассчитанное по СП. Формула выглядит следующим образом:

$$w_{m, sum} = (v_{tr}(z_e))^2 \times 0,43 \times c. \quad (2.13)$$

Для примера определим нормативное ветровое давление от трансформированного воздушного потока при ширине разрыва $S = 10$ м, на расстоянии $d_w = 30$ м, на высоте $z_e = 20$ м. Согласно таблице 2.15 скорость ветра набегающего потока $v_0 = 19,86$ м/с, скорость ветра трансформированного потока $v_{tr} = v_{cp} = 31,79$ м/с, $B_l = 10,21$ м, $b = 20$ м, $w_0 = 300$ Па (II ветровой район), тип местности «С».

Для расчета воспользуемся формулой (2.12):

$$w_{m, sum} = \frac{300 \times 0,55 \times 0,8 \times 20 + (31,79^2 \times 0,43 - 300 \times 0,55) \times 0,8 \times 10,21}{20} = 242,09 \text{ Па.}$$

При этом, нормативное ветровое давление на той же высоте, рассчитанное по СП (без учета локального изменения скорости) составляет:

$$w_{m, sum} = 300 \times 0,55 \times 0,8 = 132 \text{ Па.}$$

Таким образом, нормативное ветровое давление с учетом локального изменения скорости почти в 2 раза превышает давление, рассчитанное по СП. Рассмотренная в примере ситуация представлена на рисунке 2.30.

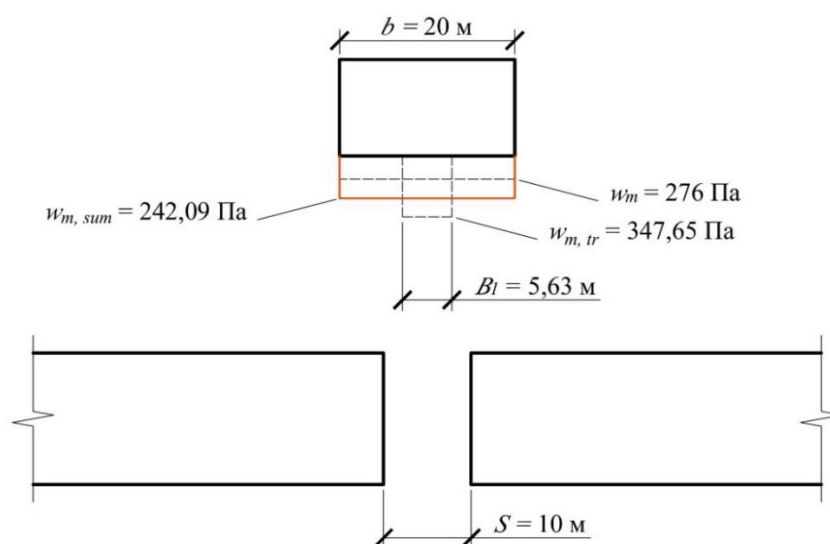


Рисунок 2.30 – Пример расчета ветрового давления от трансформированного воздушного потока

2.4. Проведение численных экспериментов II-го этапа исследования

Этот этап исследования нужен для того, чтобы выявить некоторые закономерности, связанные с расположением здания относительно разрыва и связь между такими параметрами как ширина разрыва S и ширина здания b . Также, необходимо исследовать характер распределения скоростей трансформированного воздушного потока в зависимости от расстояния от разрыва до здания d_w . Для этого проводится серия экспериментов численного моделирования с теми же входными параметрами, что и в экспериментах I-го этапа, но в модели присутствует само рассматриваемое здание (рисунок 2.31).

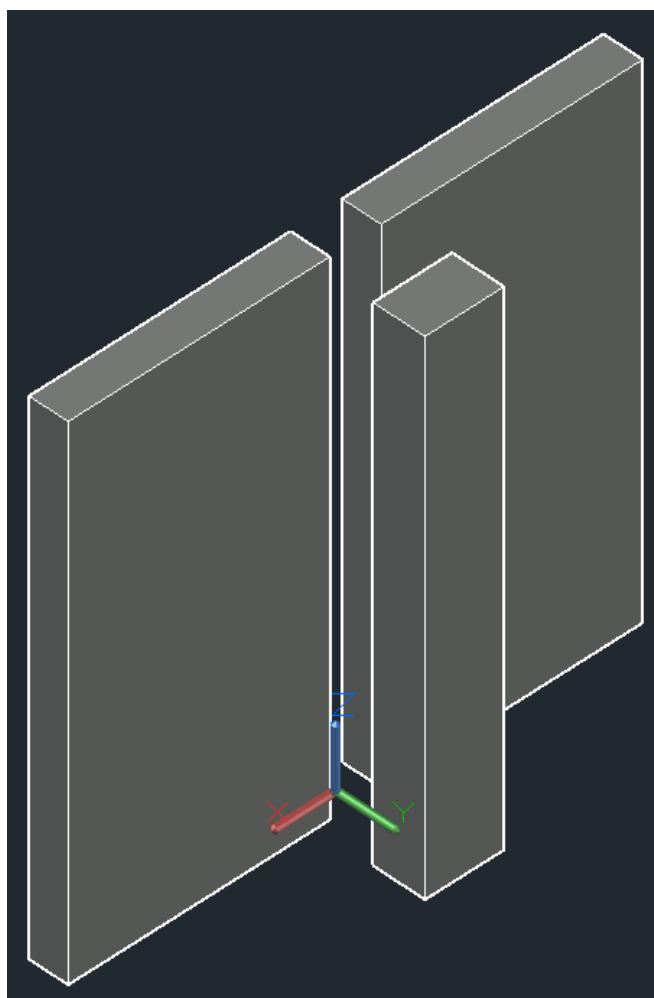


Рисунок 2.31 – Пример модели для численного эксперимента II-го этапа

В первую очередь необходимо провести серию экспериментов при одинаковых значениях ширины разрыва S и ширины здания b при различных значениях расстояния d_w (рисунок 2.32).

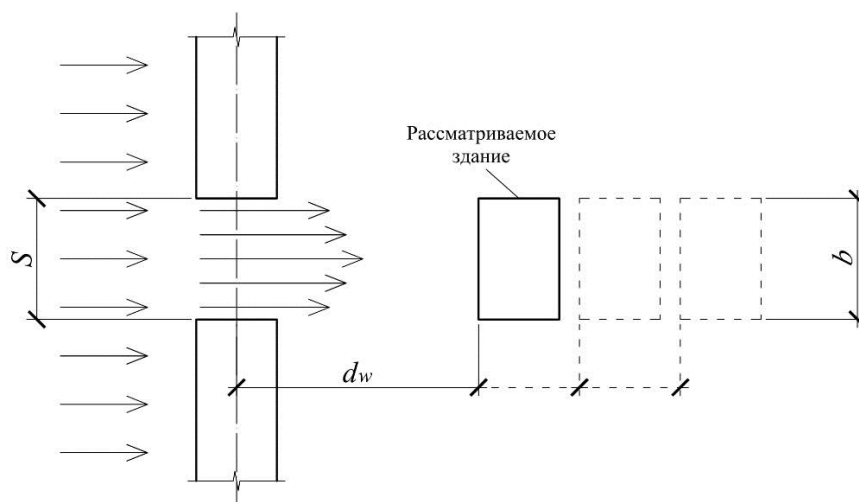


Рисунок 2.32 – Схема расчетной ситуации

По результатам серии экспериментов был сделан вывод о том, что на расстоянии $d_w = 60$ м, при $S = b$, где $S \leq 30$ м, трансформированный воздушный поток начинает отклоняться в сторону (рисунок 2.33,) вследствие чего ветровое давление на фасад рассматриваемого здания значительно снижается. В этом случае методика неприменима и можно рассчитывать ветровое давление по СП. Таким образом, максимальное расстояние d_w , при котором наблюдается увеличение ветрового давления, составляет 50 м.

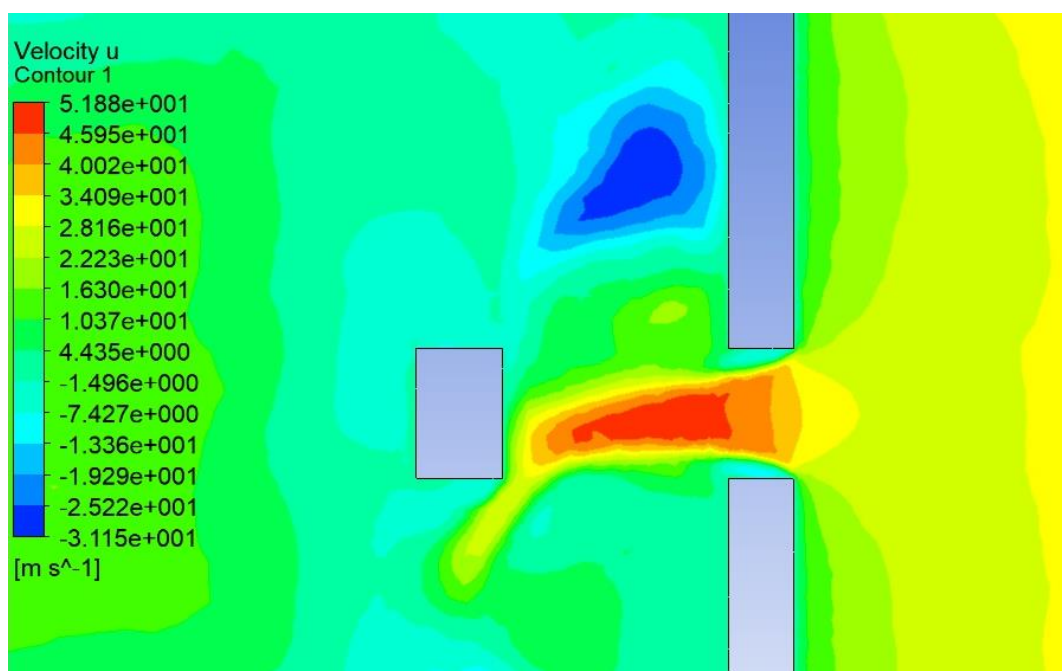


Рисунок 2.33 – Изополя скоростей трансформированного воздушного потока, прошедшего через разрыв шириной $S = 30$ м, при ширине рассматриваемого здания $b = 20$ м на расстоянии $d_w = 60$ м

Далее необходимо исследовать влияние трансформированного воздушного потока при различных соотношениях S и b . Для этого проводится новая серия численных экспериментов, направленная на получение качественной картины распределения воздушного потока. Далее приводятся только те результаты (картины распределения), которые соответствуют наиболее характерным случаям. Моделирование условий с очевидным результатом, например при b значительно больше S , не проводилось.

На рисунке 2.34 представлена картина распределения трансформированного воздушного потока, прошедшего через разрыв шириной $S = 60$ м, при ширине рассматриваемого здания $b = 20$ м.

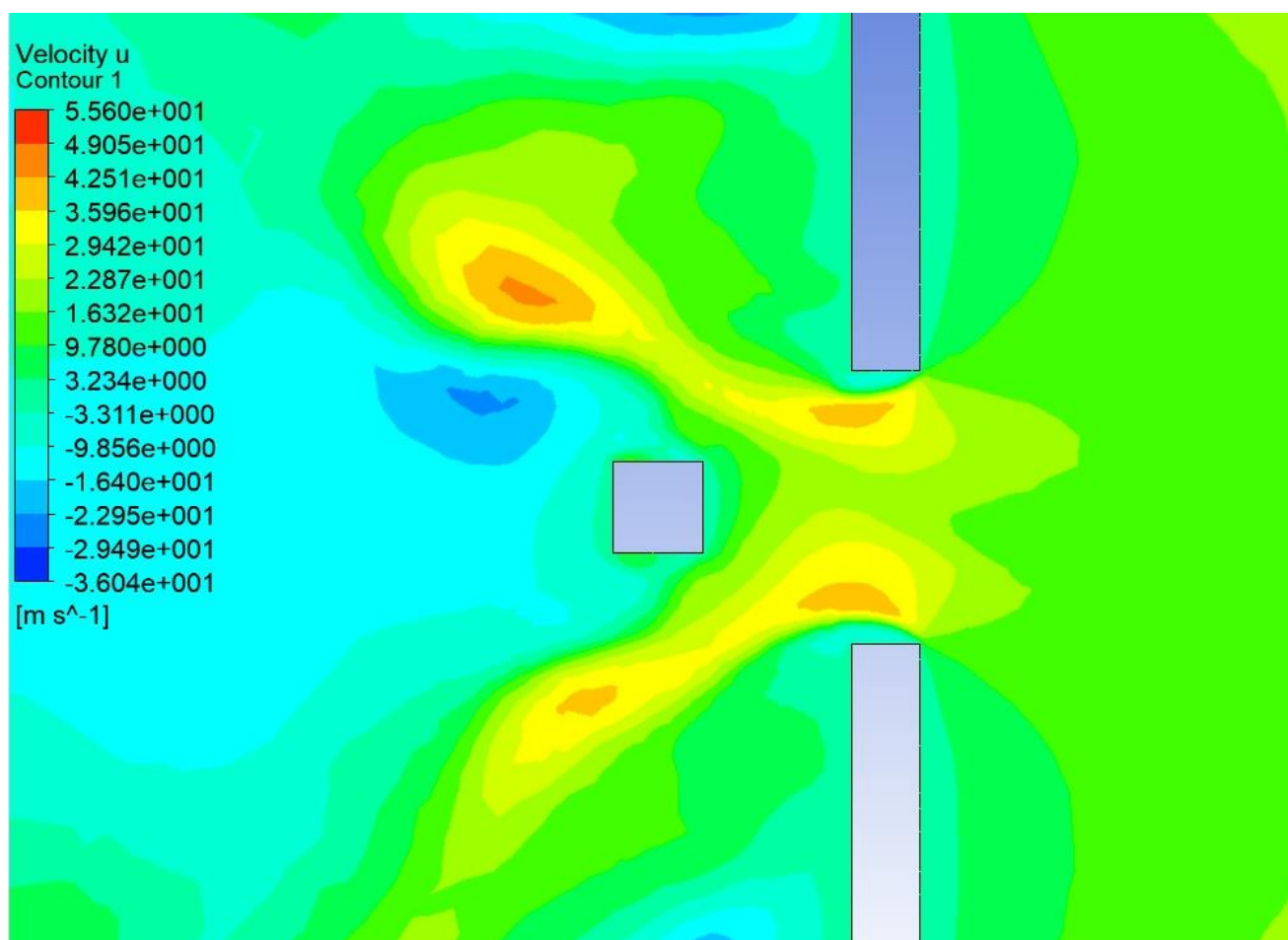


Рисунок 2.34 – Изополя скоростей трансформированного воздушного потока, прошедшего через разрыв шириной $S = 60$ м, при ширине рассматриваемого здания $b = 20$ м на высоте $z_e = 40$ м

По результатам эксперимента сделан вывод о границах применимости методики: при $S \geq 3b$, где $S \leq 50$ м – ветровое давление от трансформированного воздушного потока не учитывается т.к. ветровой поток свободно обходит здание, не оказывая существенного влияния. В этом случае ветровое давление рассчитывается по СП. Во всех остальных случаях методика применима.

Таким образом, определены границы применимости разработанной методики. На рисунке 2.35 зеленым выделена область, соответствующая условию применимости методики.

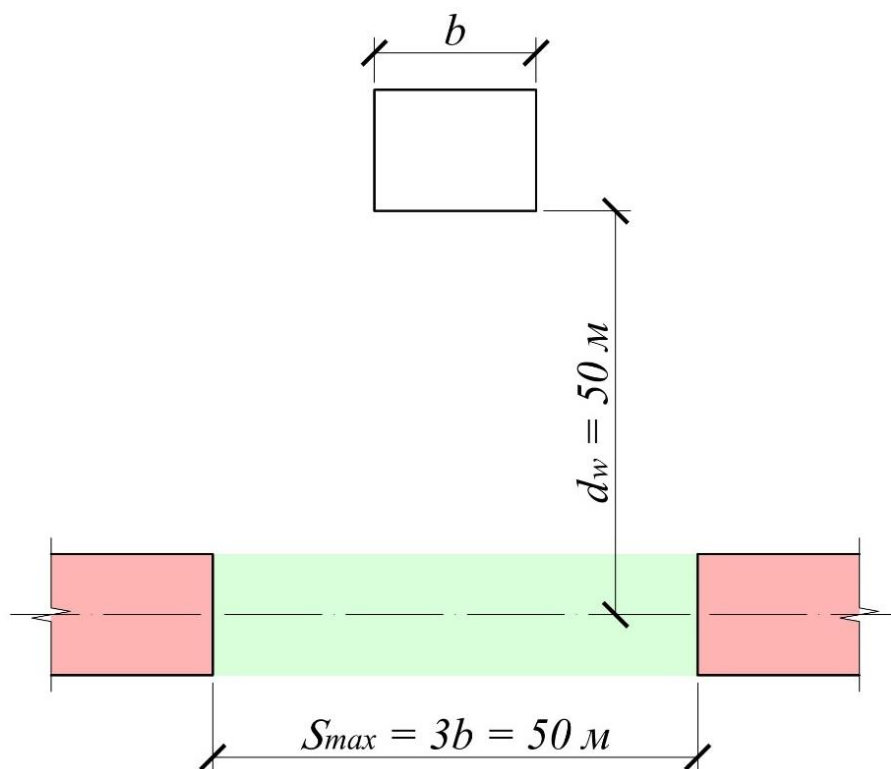


Рисунок 2.35 – Схема границ применимости методики

Учет особенностей распределения давлений по поверхности здания производится таким же образом, как и в общем случае, при помощи системы аэродинамических коэффициентов, приведенной в СП.

2.5. Сравнение результатов расчета ветровых нагрузок

Для сравнения результатов построим вертикальные профили ветрового давления, действующего на здание высотой 150 м, рассчитанные по СП и по разработанной методике.

Исходные данные: $S = 20$ м, $b = 30$ м, $d_w = 30$ м.

Результаты расчета внесены в таблицу 2.28.

Таблица 2.28 – Сравнение результатов расчета ветрового давления с учетом локальных увеличений скорости и по СП

z_e , м	v_{tr} , м/с	B_l , м	w_m , Па	$w_{m, sum}$, Па	$w_{m, sum} / w_m$
5	27,55	23,55	96	225,6	2,35
10	30,23	18,94	96	233,9	2,44
20	31,79	16,24	132	248,7	1,88
40	32,9	14,33	192	278,1	1,45
60	33,76	12,85	240	305,1	1,27
80	34,47	11,63	276	327,5	1,19
100	35,06	10,61	300	343,4	1,14
150	35,58	9,72	372	392,6	1,06

Таким образом, можно сделать вывод о том, что профили ветрового давления, рассчитанного по СП и по разработанной методике учета локальных увеличений скорости, приближаются друг к другу с высотой. Это связано с уменьшением с высотой значений эффективной ширины потока B_l . Внизу здания давление с учетом трансформации воздушного потока превышает рассчитанное по СП более чем в 2 раза.

Значения в последней колонке являются коэффициентами учета локальных скоростей ветра. Однако для составления окончательной системы коэффициентов необходимы дальнейшие исследования при различных значениях фоновой скорости ветра.

На рисунке 2.36 приведены профили ветровых давлений, построенные по результатам сравнительного расчета. Красным цветом отмечен профиль давлений, рассчитанных по методике учета локальных увеличений скорости ветра.

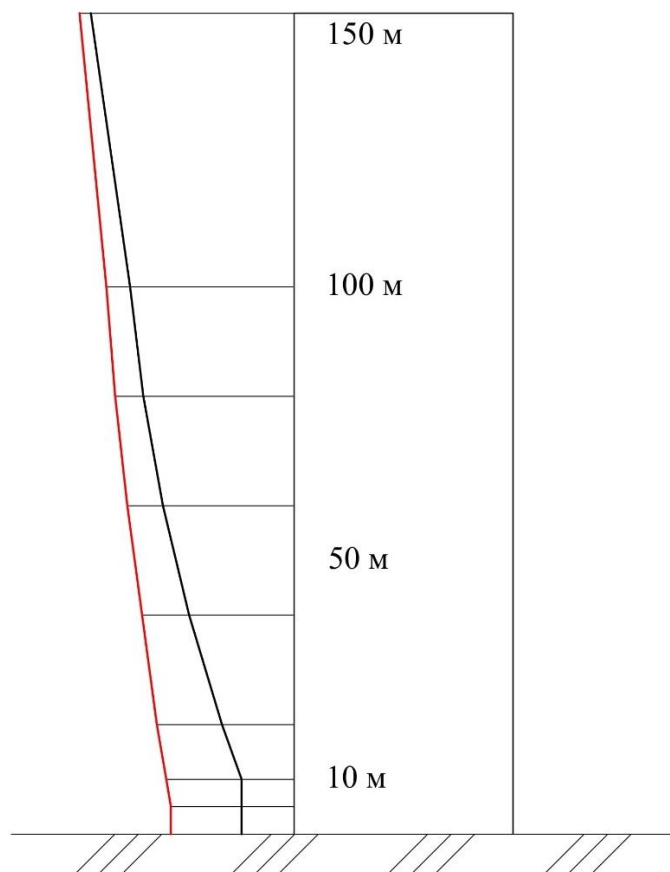


Рисунок 2.36 – Профили ветровых давлений, построенные по результатам сравнительного расчета

Очевидно, что влияние исследуемого эффекта значительно, однако для более высоких зданий оно может быть перекрыто коэффициентом надежности по нагрузке. При этом, влияние, оказываемое на здания средней этажности (15 – 50 м), является более опасным.

2.6. Выводы по результатам исследования

Основной вывод, полученный по результатам исследований, заключается в том, что локальные увеличения скорости ветра оказались настолько значительными, что трансформированный воздушный поток в некоторых случаях оказывает на рассматриваемое здание давление, в несколько раз превышающее нормативное, рассчитанное по СП.

Полученные давления действуют только в пределах соответствующих значений эффективной ширины потока B_I . Очевидно, что с высотой эти значения снижаются, а значит эффект, оказываемый на здание, также снижается. То есть значения скоростей трансформированного воздушного потока приближаются к фоновым. Таким образом, результирующее нормативное давление на здание в значительной степени зависит от значений B_I , а значит и от S .

Исследования качественной картины распределения трансформированного воздушного потока (II-ой этап исследований) позволили определить границы применимости разработанной методики. В рамках этого исследования был сделан вывод о том, что на расстоянии $d_w = 60$ м трансформированный поток теряет часть скорости и не оказывает на здание значительного эффекта. Также, при большом отношении ширины разрыва S к ширине рассматриваемого здания b (3 и более) влияние трансформированного потока значительно снижается и методика в этом случае не применима. То же происходит при ширине разрыва более 60 м – разрыв не оказывает значительного влияния на воздушный поток.

Сравнение результатов расчета ветровых давлений с учетом методики и без ее учета показало значительное увеличение ветрового давления при локальных увеличениях скорости ветра. В нижней части здания давление, рассчитанное по методике, более чем в 2 раза превышает давление, рассчитанное по СП.

ГЛАВА 3. Общие выводы и рекомендации

3.1. Общие выводы по результатам исследования

По результатам проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Полученные таблицы значений осредненных по ширине скоростей трансформированного воздушного потока свидетельствуют об уменьшении скорости ветра с расстоянием d_w , но не значительном;
2. На расстоянии $d_w = 60$ м трансформированный воздушный поток отклоняется в сторону и неспособен оказывать серьезное влияние на здание;
3. Вертикальный профиль трансформированного воздушного потока и, как следствие, ветрового давления более равномерный, чем профиль фонового воздушного потока;
4. На высоте 150 м и более давления становятся равными рассчитанным по СП, это связано с тем, что скорости трансформированного потока становятся практически равными фоновым значениям на той же высоте;
5. В самых неблагоприятных случаях, когда локальная трансформация ветрового потока и его влияние на здание особенно высоки, коэффициент надежности по нагрузке оказывается неэффективен (не перекрывает значения ветрового давления, рассчитанные по методике);
6. Разработана формула для определения ветрового давления от трансформированного воздушного потока;
7. Введено понятие эффективной ширины потока V_l , как параметр учета превышения нормативной ветровой нагрузки, который оказался чрезвычайно полезен и удобен при расчетах по методике, т.к. позволяет учитывать не только номинальное превышение ветрового давления, но и его характер распределения при различных значениях ширины здания;
8. Степень точности аппроксимации полученных графиков была оценена при расчете средней ошибки аппроксимации, которая составила 11,65 %, что свидетельствует о высокой степени точности.

Также, при исследовании вопроса были сделаны следующие выводы о состоянии проблемы и применимости разработанной методики для ее решения:

1. Существующие нормативные документы, как отечественные, так и зарубежные, не дают рекомендаций по учету параметров застройки при расчете ветровой нагрузки, хотя некоторые из них (Еврокод. Воздействия на конструкции. Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые воздействия.) позволяют учитывать топографические характеристики местности;
2. Полный учет всех параметров городской застройки при расчете ветровой нагрузки возможен, однако разработка его методологии представляет для исследователей высокую сложность;
3. Разработанная методика является попыткой упростить и систематизировать аэродинамические процессы, действующие внутри городской застройки, однако результаты численного моделирования еще должны пройти дополнительную проверку экспериментами физического моделирования;
4. Полученные результаты позволяют учитывать локальные изменения скоростей воздушного потока при расчете ветровой нагрузки на высотные здания без проведения специальных исследований, что снижает стоимость проектных работ;
5. Разработанная методика применима также для зданий средней этажности (25 – 75 м).

3.2. Рекомендации по использованию разработанной методики учета локальных изменений скорости ветра при расчете ветровых нагрузок

В результате проведенных исследований можно сформулировать следующие рекомендации и предложения:

6. Для более эффективного учета рассматриваемого явления необходимо производить расчеты с учетом общей и локальной роз ветров в районе проектирования;
7. В некоторых случаях возможно снижение ветровой нагрузки на небольшой высоте, связанное с повышенной шероховатостью местности (зеленые насаждения, объекты инфраструктуры и пр.);
8. Чаще всего в застройке присутствуют здания различной этажности. В этом случае за максимальную высоту действия эффекта принимается наиболее низкое из участвующих в трансформации потока зданий;
9. В случаях, когда рассматриваемое здание находится в зоне ветровой тени от близлежащих зданий и защищено от ветрового воздействия, но поблизости присутствует разрыв, расчет по методике также необходим для проектирования фасадных конструкций и учета локальной ветровой нагрузки;
10. Разработанная методика является уточнением к СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», а именно к расчету статической составляющей ветровой нагрузки;
11. Также рекомендуется пользоваться положениями Еврокод. Воздействия на конструкции. Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые воздействия.

3.3. Перспективы дальнейших исследований проблемы

Разработанная методика учета локальных изменений скорости ветра в городской застройке при расчете ветровых нагрузок основана на формуле для расчета суммарного ветрового давления $w_{m, sum}$ (2.12). Однако, удобнее всего, привести полученные значения давлений к системе коэффициентов к нормативному ветровому давлению w_0 . Это позволит упростить процесс расчета для проектировщика. Но для формирования такой системы необходимо провести такие же исследования для различных скоростей ветра, чтобы получить точные сведения о процессе и удостовериться в справедливости полученных результатов применительно к различным ситуациям. В связи с этим можно определить шаги для дальнейших исследований этой проблемы:

1. Повторение исследований для различных скоростей ветра (ветровые районы);
2. Подтверждение результатов серией испытаний в аэродинамической трубе с использованием современных систем определения параметров воздушного потока (цифровая трассерная визуализация, лазерная доплеровская велосиметрия);
3. Исследование локальных изменений скорости ветра при различных параметрах застройки и ветра (расположение и взаиморасположение зданий, различные углы между зданиями и т.п.);
4. Учет различных явлений, связанных с нарушением аэродинамических свойств воздушного потока, например, аэродинамическая интерференция в сложной застройке;
5. Определить более точные границы применимости, связанные с вопросом рациональности использования методики в случаях когда коэффициент надежности по ветровой нагрузке перекрывает влияние этого эффекта.

Дальнейшие исследования необходимы также и для верификации полученных результатов и для возможного включения в нормативную базу в дальнейшем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования была построена общая методика учета локальных изменений скорости ветра в городской застройке и основные принципы. Разработанная методика позволяет выполнить расчет статического ветрового давления на здание от трансформированного воздушного потока, прошедшего через разрыв между зданиями. Учет этого явления должен производиться при разработке генплана либо при непосредственно проведении расчетов конструкций здания.

Выведены расчетные формулы и сформированы таблицы для расчета по разработанной методике. В целом методика позволяет произвести учет явления локальных изменений скорости ветра в высотной застройке без проведения экспериментальных исследований.

Определены границы применимости методики и перспективы дальнейших исследований в этом направлении. Выполненная работа имеет практическую ценность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Серебровский, Ф.Л. Аэрация жилой застройки / Ф.Л. Серебровский. – М.: Стройиздат, 1971. – 112 с.
2. Оленьков, В.Д. Аэрационный режим города и его учет в градостроительном проектировании / В.Д. Оленьков, Д.С. Колбин // Строительство и образование. – Екатеринбург, 2011. – С. 71-74.
3. Серебровский, Ф.Л. Аэрация населенных мест / Ф.Л. Серебровский. – М.: Стройиздат, 1985. – 172 с.
4. Семашко, К.И. Руководство по оценке и регулированию ветрового режима жилой застройки. – М.: Стройиздат, 1986. – 59 с.
5. Eurocode 1: Basis design and action on structures. Part 2-4: “Wind action”. ENV 1991 – 2 – 4 // CEN, 1994.
6. Оленьков, В.Д. Учет ветрового режима городской застройки при градостроительном планировании с использованием технологии компьютерного моделирования / В.Д. Оленьков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура» – 2017. – Том 17. – №4 – С. 21-27.
7. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*// Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2016.
8. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. Гидродинамика. — Издание 4-е, стереотипное. – М.: Наука, 1988. — 736 с. — («Теоретическая физика», том VI).
9. Рейнольдс, Осборн // Википедия. [2019—2019]. Дата обновления: 08.02.2019. URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=97980603> (дата обращения: 08.02.2019).
10. Число Рейнольдса // Википедия. [2019—2019]. Дата обновления: 02.06.2019. URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=100195861> (дата обращения: 02.06.2019).
11. Число Струхали // Википедия. [2013—2013]. Дата обновления: 29.11.2013. URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=59797737> (дата обращения: 29.11.2013).
12. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения – Пер. с англ. Б.Е. Маслова, А.В. Швецово́й; Под ред. Б.Е. Маслова. // М.: Стройиздат, 1984

13. Лобовое сопротивление // Википедия. [2019—2019]. Дата обновления: 04.04.2019. URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=99021445> (дата обращения: 04.04.2019).

14. Вязкость // Википедия. [2019—2019]. Дата обновления: 27.04.2019. URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=99462965> (дата обращения: 27.04.2019).

15. Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф. // Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. – М., ИАСВ, 2007.

16. Горохов Е.В., Кузнецов С.Г., Васылев В.Н. Воздействие ветра на высотные здания и их комплексы // Сборник научных трудов. Москва: МГСУ, 2008.

17. Уникальная научная установка "Большая исследовательская градиентная аэродинамическая труба" // МГСУ URL: <http://mgsu.ru/customer/Oborudovaniye/Aerodinamika/Eksperimentalnyy-stend-dlya-aerodinamicheskikh-i-akkusticheskikh-ispytaniy-stroitelnykh-konstruktsiy/> (дата обращения: 12.06.2019).

18. Дубинский С.И. Расчеты высотных сооружений при ветровом воздействии // САПР и графика №10, 2005.

19. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Мсхалая И.Ж. Сравнительный анализ программных комплексов при экспертизе состояния системы “ребристая оболочка-колонна со связями. // Труды XXI международной конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов”. – «ВЕМ&FEM-2005», С-Петербург, 2006

20. Вычислительная гидродинамика // Википедия. [2018—2018]. Дата обновления: 20.12.2018. URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=96952403> (дата обращения: 20.12.2018).

21. СНиП 2.01.07 – 85*. Нагрузки и воздействия // Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2001.

22. Поддаева, О.И. Архитектурно-строительная аэродинамика: Учебное пособие / О.И. Поддаева, А.С. Кубенин, П.С. Чурин. – 2-е изд. - М.: МГСУ, 2017. – 88 с.

23. Дубинский С.И. Программный комплекс ANSYS LS-DYNA 8.0. / САПР и графика. №3, 2004.
24. Дубинский С.И. ANSYS и ANSYS/CivilFEM в строительстве. // САПР и графика. № 12, 2004.
25. Бахрушин В. Е. Методы оценивания характеристик нелинейных статистических связей // Системные технологии. — 2011. — № 2(73). — С. 9—14.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций автора

1. Оленьков, В.Д. Градостроительные пути решения экологических проблем (на примере Челябинской агломерации) / В.Д. Оленьков, Н.Т. Тазеев // Материалы 69-й научной конференции «Наука ЮУрГУ»: секции технических наук. – Челябинск: ЮУрГУ, 2017. – С. 113-119.

2. Olenkov V.D. Urban planning problems of agglomerations / V.D. Olenkov, N.T. Tazeev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017 – №262. – 012155. (SCOPUS).

3. Оленьков, В.Д. Ускоренная генерализация рельефа с помощью использования цифровой модели местности / В.Д. Оленьков, А.Д. Бирюков, Н.Т. Тазеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2018. – Т. 18, №2. – С.18-27.

4. Оленьков, В.Д. Определение коэффициентов трансформации воздушного потока при воздействии на одиночное здание с использованием технологий компьютерного моделирования / В.Д. Оленьков, А.Д. Бирюков, Н.Т. Тазеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2019. – Т. 19, №1. – С. 5-13.

5. Olenkov V.D. Three-dimensional modeling of buildings and structures for simulation of wind effects on urban areas / V.D. Olenkov, A.D. Biryukov, N.T. Tazeev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018 – №451. – 012162. (SCOPUS).

6. Оленьков, В.Д. Численное моделирование ветрового воздействия на одиночное здание с использованием технологий численного моделирования / В.Д. Оленьков, А.Д. Бирюков, Н.Т. Тазеев, К.С. Коротеев // Сборник научных трудов РААСН. – 2019. – Т.1. – С. 363-378.