Научная статья
УДК 711.4:551.58

РАСЧЁТНАЯ ОЦЕНКА ВЕТРОВОГО КОМФОРТА ПЕШЕХОДНЫХ ПРОСТРАНСТВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МОРФОТИПАХ ЗАСТРОЙКИ

Олейникова Раиса Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент,
Керченский государственный морской технологический университет,
Россия, Керчь, raisa.oleinikova@inbox.ru

Аннотация. Формирование плотной городской застройки неизбежно изменяет аэродинамический режим приземного слоя, порождая локальные зоны ветрового дискомфорта и создавая риски для безопасности пешеходов. Традиционная практика оценки изолированных архитектурных объектов не отражает кумулятивного эффекта сложной городской среды. В статье предложен вероятностный подход к оценке ветрового комфорта на уровне градостроительных морфотипов. Численное моделирование выполнено с применением модели турбулентности Realizable k−ε в соответствии с методическими рекомендациями Архитектурного института Японии. Для перехода от осредненных полей скоростей к реальным условиям эксплуатации результаты CFD-расчетов для восьми основных румбов интегрированы с данными годовой розы ветров и распределением скоростей по закону Вейбулла. Критерии Лоусона адаптированы с учетом вероятности превышения пороговых значений для различных видов деятельности человека. Выявлены характерные особенности воздушных потоков при периметральной, строчной, башенной на стилобате и смешанной застройке. Установлено, что башенные комплексы генерируют наиболее обширные зоны нисходящих турбулентных потоков, тогда как строчная застройка при высоком отношении высоты здания к ширине улицы формирует выраженные аэродинамические коридоры. В работе также обсуждаются фундаментальные ограничения RANS-подхода в части моделирования нестационарных вихрей и формулируются практические

рекомендации по нивелированию рисков, включая скосы наветренных граней, устройство открытых первых этажей и использование древесных насаждений для ослабления сильных порывов ветра.

Ключевые слова: градостроительные морфотипы; ветровой комфорт пешеходных зон; вычислительная гидрогазодинамика (CFD); моделирование турбулентности; критерии оценки ветрового режима; аэродинамика городской застройки; градостроительное регулирование; вероятностный анализ.

Original article

ESTIMATED ASSESSMENT OF WIND COMFORT OF PEDESTRIAN SPACES WITH VARIOUS DEVELOPMENT TYPES

Oleinikova Raisa Evgenevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia, raisa.oleinikova@inbox.ru

Abstract. Dense urban development alters near-ground wind conditions, creating localized areas of wind discomfort and posing risks to pedestrian safety. Traditional assessments of isolated architectural features fail to capture the cumulative effects of a complex urban environment. This article proposes a probabilistic approach to assessing wind comfort at the level of urban morphotypes. Numerical modeling was performed using the Realizable k−ε turbulence model in accordance with the guidelines of the Architectural Institute of Japan. To translate averaged velocity fields into real-world operating conditions, CFD simulation results for the eight cardinal directions were integrated with annual wind rose data and a Weibull velocity distribution. Lawson criteria were adapted to account for the probability of exceeding threshold values for various types of human activity. Characteristic airflow patterns were identified for perimeter-block developments, linear layouts, towers on podiums, and mixed building configurations. It was found that tower complexes generate the most extensive zones of downward turbulent flows, while row buildings with high height-to-street-width

ratios form distinct aerodynamic corridors. The paper also discusses the fundamental limitations of the RANS approach for modeling unsteady vortices and formulates practical recommendations for risk mitigation, including the use of beveled windward faces, the use of porous ground floors, and the use of trees as a porous medium to dampen peak gusts.

Keywords: urban development morphotypes; wind comfort of pedestrian areas; computational fluid dynamics (CFD); turbulence modeling; wind regime assessment criteria; urban development aerodynamics; urban planning regulation; probabilistic analysis.

Введение. Интенсификация градостроительной деятельности и массовое возведение высотных доминант радикально трансформируют аэродинамический режим городских территорий [1]. Формирование зон с аномальными скоростями воздушных потоков на уровне пешехода представляет собой устойчивую проблему, которая в развитых странах фиксируется уже более трех десятилетий. Ветер, взаимодействуя с плотной городской тканью, порождает нисходящие потоки и угловые вихри, способные не только вызывать физический дискомфорт, но и создавать прямую угрозу безопасности граждан, повреждая уличную инфраструктуру или затрудняя передвижение [2].

Последствия таких явлений выходят за рамки инженерных задач и могут становиться причиной социальных конфликтов. Как показывает многолетний опыт Японии, конфликты между девелоперами и местными жителями из-за неблагоприятного ветрового климата регулярно перерастают в судебные разбирательства. В ответ на это органы местного самоуправления, например, правительство Токио, ввели обязательные процедуры предварительной оценки воздействия на окружающую среду для объектов высотой свыше 100 метров или с общей площадью более 100 000 м². Подобные административные регламенты подчеркивают: игнорирование ветрового фактора на стадии эскизного проектирования недопустимо и влечет за собой существенные репутационные и

финансовые риски для застройщиков [3], [4].

Между тем традиционный подход, при котором здание рассматривается как единственный источник возмущения воздушного потока, не позволяет в полной мере учитывать влияние окружающей застройки. Реальный городской ландшафт представляет собой сложную систему, где аэродинамическое влияние соседних объемов суммируется или, напротив, компенсируется [5-7]. Именно поэтому научное сообщество все чаще смещает фокус с точечного анализа отдельных сооружений на изучение градостроительных морфотипов. Морфотип, объединяющий кварталы со схожими параметрами плотности, этажности и конфигурации застройки, позволяет выявить системные закономерности формирования ветрового режима [8]. Такой подход дает возможность оценивать совокупное влияние городской среды, что принципиально недостижимо при изолированном рассмотрении каждого объекта в отрыве от его окружения.

Количественное описание ветровой обстановки сегодня опирается на два взаимодополняющих инструмента: физические эксперименты в аэродинамических трубах и численное моделирование методами вычислительной гидрогазодинамики (CFD). При этом стремительный рост популярности CFD-расчетов потребовал выработки строгих критериев достоверности. В 2007 году Архитектурный институт Японии (AIJ) опубликовал фундаментальные рекомендации по практическому применению CFD для оценки ветровой среды вокруг зданий. Данный документ систематизировал требования к размерам вычислительной области, параметрам сеточных моделей, граничным условиям и схемам турбулентности, обеспечив сопоставимость результатов с данными натурных измерений [9]. Однако при применении осреднённых по Рейнольдсу моделей турбулентности (RANS) возникает несоответствие: расчёт даёт осреднённые скорости, тогда как классические критерии дискомфорта (например, методика Мураками, основанная на частоте ежедневных максимальных порывов) требуют учёта пиковых значений [10]. Это влечет за собой необходимость введения поправочных коэффициентов

порывистости, единый подход к определению которых пока не сформирован.

В свете изложенного, разработка методов оценки ветрового комфорта, адаптированных именно для типовых градостроительных морфотипов, выступает актуальной научно-технической задачей. Переход от фрагментарного анализа к комплексному моделированию городских кварталов позволит сформировать надежную доказательную базу для совершенствования нормативных требований [11]. Внедрение таких подходов в практику градостроительного регулирования обеспечит принятие обоснованных решений, направленных на создание безопасной и комфортной среды для пешеходов в условиях высокоплотной застройки.

Обзор литературы. Формирование плотной городской ткани влечет за собой радикальную трансформацию аэродинамического режима приземного слоя атмосферы. Взаимодействие воздушных потоков с массивными архитектурными объемами порождает сложные турбулентные структуры: нисходящие течения, угловые вихри и эффекты аэродинамической трубы в межквартальных пространствах. Как фиксируют Р. Йошие и М. Ооба (Yoshie & Ohba, 2009), проблема неблагоприятного ветрового режима вокруг высотных доминант остается острой социальной задачей уже более трех десятилетий, регулярно становясь причиной конфликтов между девелоперами и жителями. В ответ на это регуляторные практики, например, в Токио, обязывают застройщиков проводить оценку воздействия на окружающую среду для объектов высотой свыше 100 метров, используя данные аэродинамических труб или численного моделирования [12-14].

Традиционный подход, рассматривающий изолированное здание, уступает место анализу градостроительных морфотипов. Морфотип, объединяющий территории со схожими параметрами этажности, плотности и конфигурации, позволяет выявить системные закономерности ветрового режима, недостижимые при точечном анализе [15]. При этом численное моделирование методами вычислительной гидрогазодинамики (CFD) стало доминирующим

инструментом исследования. Однако стремительный рост его применения потребовал унификации методологии. В 2007 году Архитектурный институт Японии (AIJ) опубликовал руководство по практическому применению CFD для оценки ветровой среды, систематизировавшее требования к размерам расчетной области, параметрам сетки и граничным условиям [16], [17].

Ключевой методологической сложностью остается сопоставление результатов CFD-расчетов с критериями комфорта. Большинство промышленных расчетов опираются на осредненные по Рейнольдсу модели турбулентности (RANS), выдающие средние скорости ветра. Между тем классические критерии, такие как методика Лоусона или подход Мураками, оперируют понятием ежедневных максимальных порывов. Прямое использование средних скоростей без введения поправочного коэффициента порывистости приводит к существенному занижению уровня дискомфорта. Кроме того, ветровой комфорт нельзя сводить к фиксированным пороговым значениям (например, 4, 6, 8 или 10 м/с) без учета вероятностного характера ветрового климата. При оценке необходимо учитывать частоту превышения пороговых скоростей для различных видов деятельности (сидения, стояния, ходьбы), годовую розу ветров и распределение скоростей для конкретного региона [18], [19]. Отдельно необходимо оценивать риски падения пешеходов и повреждения инфраструктуры при экстремальных порывах ветра.

Методы исследования. Объектом исследования выступили четыре базовых градостроительных морфотипа: периметральная застройка (закрытый квартал), строчная застройка, башенная застройка на стилобате и смешанная фрагментированная застройка. Для сопоставимости результатов площадь расчётного участка оставалась неизменной, а коэффициент застройки (BCR) и отношение высоты здания к ширине улицы (H/W) варьировались при сохранении сопоставимого коэффициента плотности застройки (FAR).

Численное моделирование выполнялось в программном комплексе ANSYS Fluent. По результатам предварительного сравнения расчётов с эталонными

данными аэродинамической трубы для одиночного высотного здания и квартальной застройки (Yoshie et al., 2007) была выбрана модель турбулентности Realizable k−ε. Данная модификация демонстрирует превосходство над стандартной моделью k−ε в прогнозировании зон отрыва потока и рециркуляции за препятствиями, оставаясь при этом менее ресурсоемкой, чем моделирование крупных вихрей (LES).

Расчетная область соответствовала рекомендациям AIJ: протяженность составляла 5H до наветренной границы, 15H за подветренной границей, по 5H с боковых сторон и 5H по высоте (где H – характерная высота застройки). На входе задавался логарифмический профиль скорости ветра $U(z) = \frac{u_*}{\text{к}} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$ с соответствующими профилями турбулентной кинетической энергии и скорости ее диссипации. Для моделирования растительности применялась модель пористой среды: в уравнение количества движения вводились дополнительные члены (модель Дарси–Форхгеймера), учитывающие аэродинамическое сопротивление крон деревьев и потерю импульса воздушного потока. Это позволяет количественно оценить ветрозащитный эффект озеленения.

Независимость решения от расчетной сетки подтверждалась методом Ричардсона на трех уровнях дискретизации (грубая, средняя, мелкая). Индекс сходимости сетки (Grid Convergence Index, GCI) для ключевых точек на уровне пешехода (1.5 м) не превышал 5%. Критерием сходимости итерационного процесса служило снижение невязок до 10^{-4} и стабилизация мониторинга скоростей в контрольных точках.

Для перехода от детерминированных полей скоростей к вероятностной оценке комфорта применялась процедура свертки. Результаты CFD-моделирования для восьми основных румбов (С, СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ) взвешивались согласно частотам повторяемости направлений ветра и распределению скоростей по закону Вейбулла для типичного крупного города умеренной климатической зоны. Пороговые значения комфорта по Лоусону адаптировались с использованием коэффициента порывистости 1.6 для перевода

средних скоростей RANS в пиковые значения: для длительного сидения предел составлял 2 м/с, для стояния – 3 м/с, для комфортной ходьбы – 5 м/с. Порог безопасности устанавливался на уровне 15 м/с (с учетом порывов).

Результаты исследования и их обсуждение. Проверка выбранного расчётного подхода по данным Yoshie et al. (2007) показала удовлетворительное совпадение результатов: среднеквадратичная ошибка (RMSE) профилей скорости в зонах рециркуляции не превышала 12%, что свидетельствует о применимости модели Realizable k−ε для задач градостроительной аэродинамики.

Анализ карт распределения скорости ветра на высоте 1,5 м позволил выявить характерные особенности воздушных потоков для каждого морфотипа. Периметральная застройка демонстрирует высокий уровень защиты внутреннего дворового пространства, где скорости редко превышают 2 м/с. Однако у наветренных углов таких кварталов наблюдается значительное локальное увеличение скорости воздушного потока. При строчной застройке и отношении H/W > 1,5 наблюдается выраженный эффект аэродинамической трубы: скорость ветра в межквартальных проходах возрастает, а доля площади, не соответствующей критерию комфорта для ходьбы, достигает 35–40 % при преобладающем направлении ветра вдоль улиц.

Наиболее неблагоприятные условия фиксируются в морфотипе башенной застройки на стилобате. Нисходящие потоки, ударяясь о широкую горизонтальную поверхность стилобата, растекаются во все стороны, создавая обширные зоны турбулентности и высоких скоростей на уровне пешехода. Чередование зданий разной высоты в смешанной застройке частично нарушает упорядоченность нисходящих потоков. При этом необходимо тщательно выбирать взаимное расположение зданий, чтобы избежать образования дополнительных зон ветрового дискомфорта с подветренной стороны (рисунок 1).

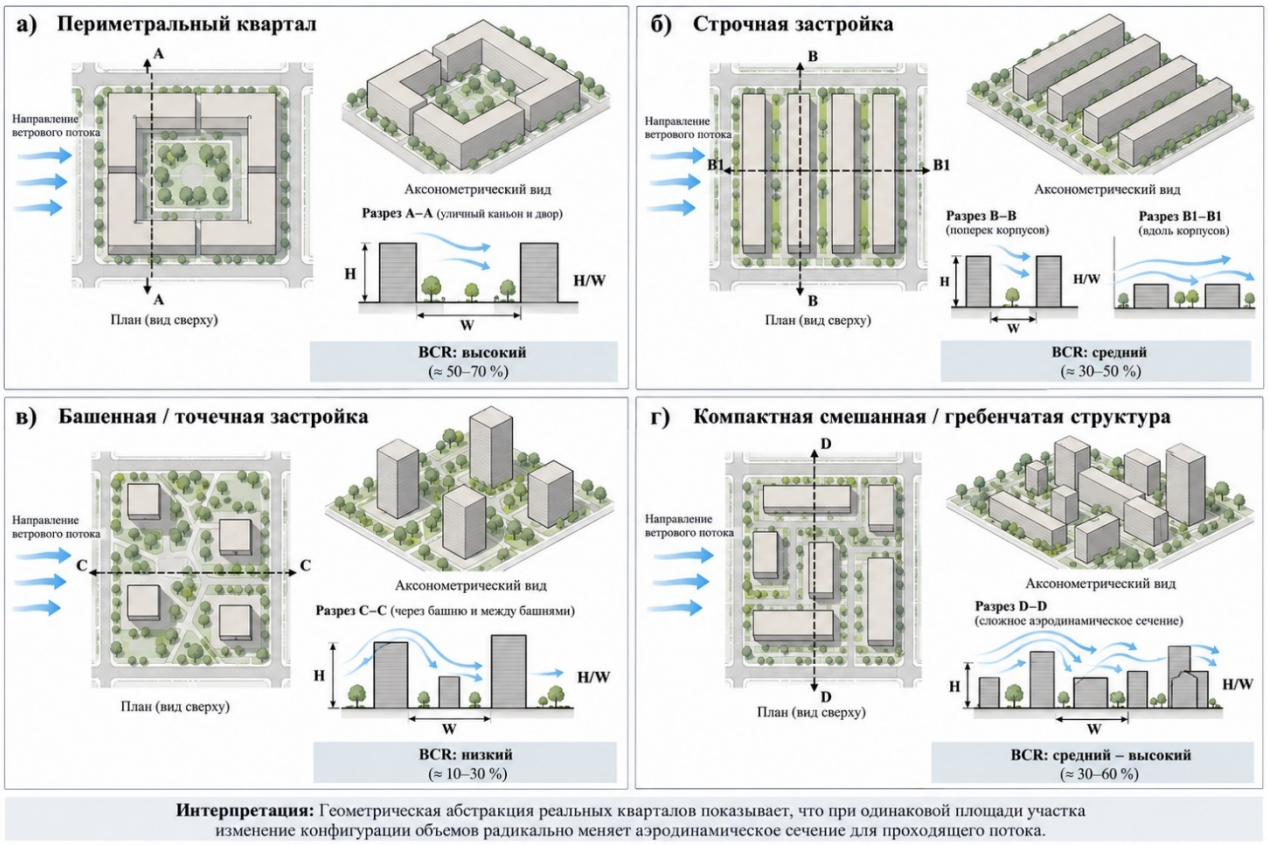


Рисунок 1 - Схематическое представление четырех исследуемых градостроительных морфотипов с указанием варьируемых параметров (H/W, BCR) и направлений расчетных разрезов (источник: разработано автором)

Главным авторским результатом исследования стала формализация безразмерных зависимостей между параметрами морфотипа и вероятностью ветрового дискомфорта (рисунок 2).

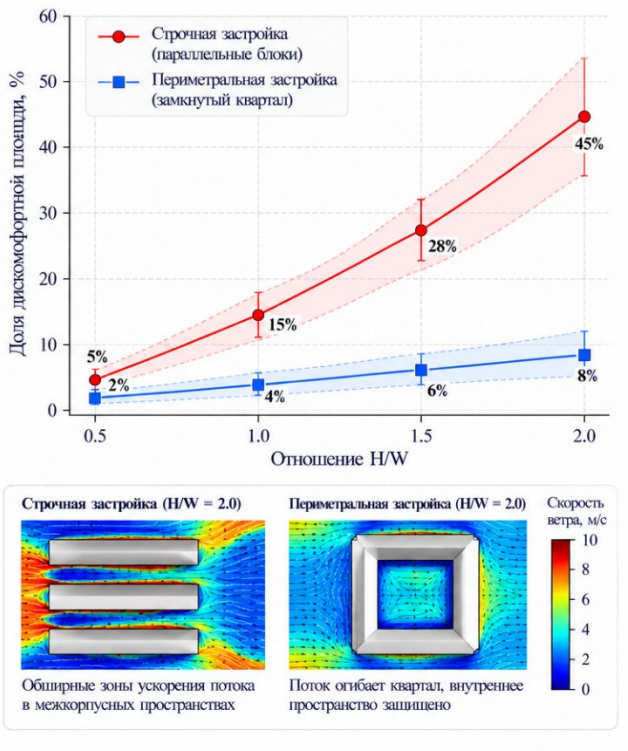


Рисунок 2 - График зависимости доли площади, не соответствующей критерию комфорта «ходьба» (вероятность превышения 5 м/с более 10% времени), от отношения H/W для строчной и периметральной застройки (источник: разработано автором)

Объединение результатов расчётов с данными годовой розы ветров позволило оценить ветровой комфорт с учётом климатических условий (рисунок 3).

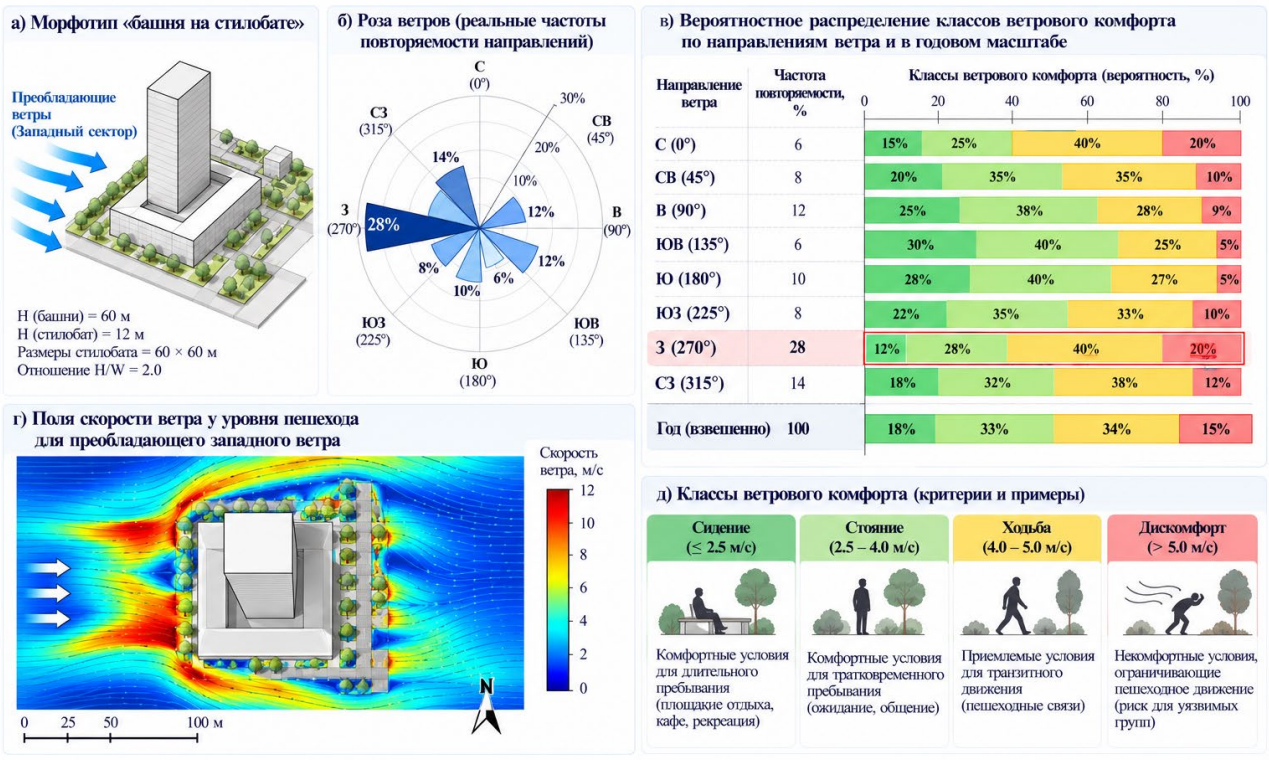


Рисунок 3 - Диаграмма вероятностного распределения классов ветрового комфорта (сидение, стояние, ходьба, дискомфорт) для морфотипа «башня на стилобате» с учетом реальных частот повторяемости направлений ветра (источник: разработано автором)

Разработанные градостроительные рекомендации базируются на количественной оценке эффективности конкретных архитектурных приемов. Скосы наветренных углов зданий (на уровне первых 3-5 этажей) снижают интенсивность угловых вихрей, уменьшая зону дискомфорта на 15-20% (рисунок 4).

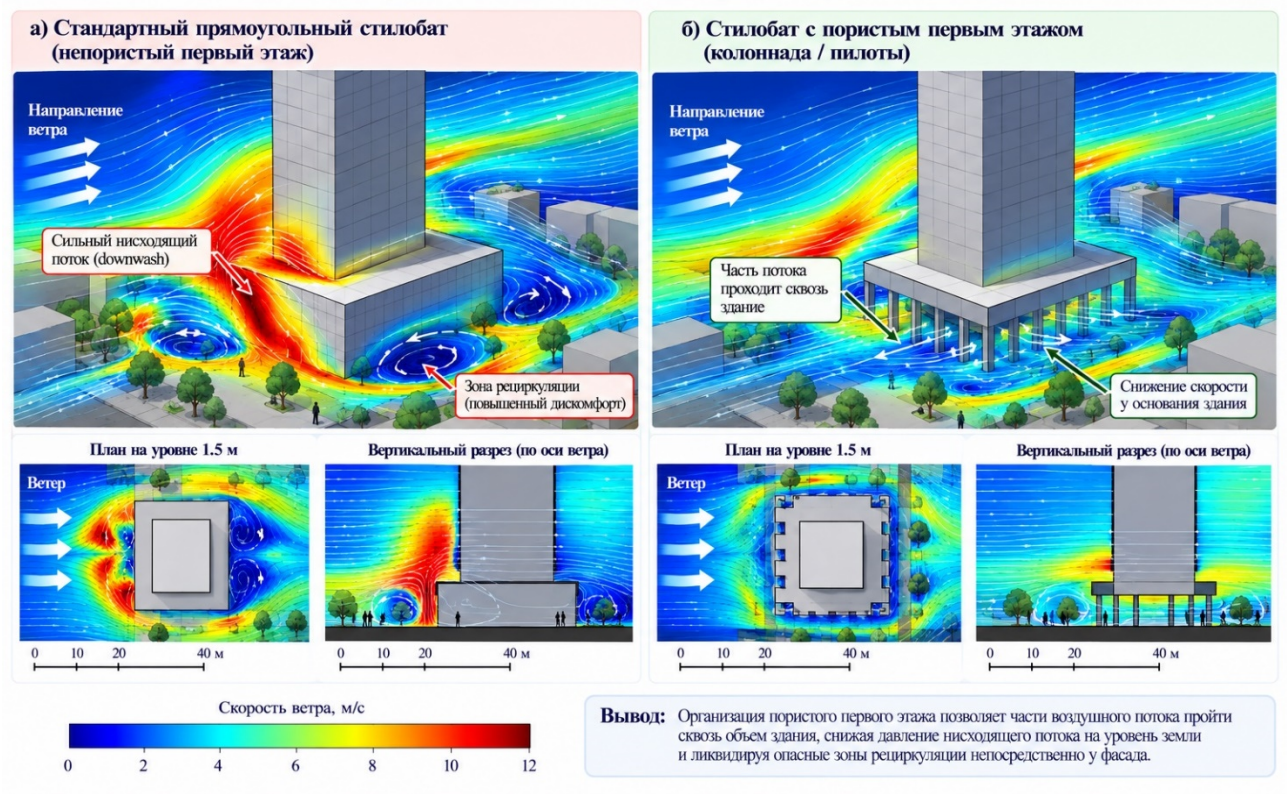


Рисунок 4 - Сравнение полей скоростей ветра у основания здания: а) стандартный прямоугольный стилобат; б) стилобат с пористым первым этажом (колоннада/пилоты) (источник: разработано автором)

Особое внимание уделено роли озеленения. Моделирование деревьев как пористой среды с заданным коэффициентом лобового сопротивления показало, что плотные рядовые посадки вдоль улиц способны снизить среднюю скорость ветра в зоне пешехода на 1.5–2.5 м/с (рисунок 5).

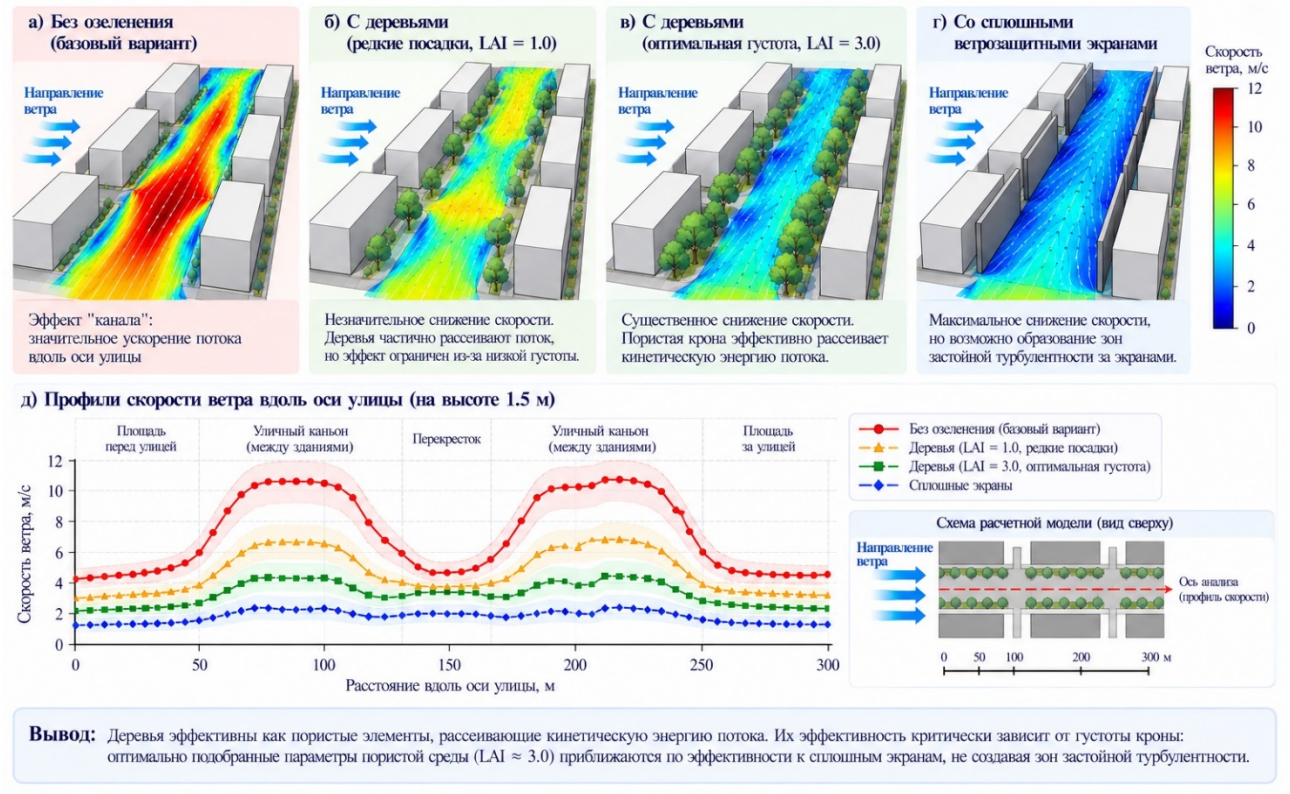


Рисунок 5 - Профили скорости ветра вдоль оси улицы при строчной застройке: без озеленения, с моделированием деревьев как пористых элементов, с моделированием сплошных ветрозащитных экранов (источник: разработано автором)

Раздельная оценка показателей ветрового комфорта и безопасности свидетельствует о необходимости дифференцированной интерпретации средней скорости воздушного потока и расчётной скорости порывов. При средней скорости ветра 3–4 м/с и принятом коэффициенте порывистости 1,6 соответствующая оценка кратковременных максимальных скоростей составляет 4,8-6,4 м/с. Полученный диапазон не достигает рассматриваемого порогового значения 15 м/с, установленного для оценки неблагоприятных ветровых воздействий. Следовательно, наличие зон с приемлемыми средними скоростями не может само по себе служить основанием для вывода о приближении ветровых порывов к критическому уровню. Для оценки безопасности необходимо отдельно рассматривать экстремальные метеорологические сценарии, локальные эффекты ускорения потока и повторяемость соответствующих условий. При разработке планировочных мероприятий целесообразно сочетать

изменения геометрии застройки с устройством защитных озеленённых полос и иных элементов, обеспечивающих перераспределение воздушных потоков в пешеходном пространстве.

Таким образом, переход от анализа изолированных зданий к вероятностной оценке градостроительных морфотипов позволяет сформировать научно обоснованную базу для нормирования ветрового режима. Внедрение предложенных безразмерных зависимостей и протоколов CFD-моделирования в практику градостроительного регулирования обеспечит создание безопасной и комфортной среды, минимизируя риски на стадии предпроектных проработок.

Выводы. Проведенное исследование подтверждает целесообразность перехода от точечной оценки изолированных архитектурных объектов к комплексному анализу градостроительных морфотипов. Интеграция результатов численного моделирования с данными реальной годовой розы ветров позволяет сформировать вероятностную картину ветрового режима, максимально приближенную к фактическим условиям эксплуатации городской среды. Выявленные безразмерные зависимости между геометрическими параметрами застройки, такими как отношение высоты здания к ширине улицы, и долей дискомфортных зон создают надежную эмпирическую базу для нормирования. Такой подход дает специалистам возможность прогнозировать аэродинамические риски еще на стадии предпроектных проработок, не прибегая к ресурсоемким расчетам каждого индивидуального здания в отрыве от его окружения.

При этом необходимо учитывать ограничения применимости осреднённых по Рейнольдсу моделей турбулентности. Выбранный в исследовании вариант Realizable k−ε, полностью соответствующий рекомендациям Архитектурного института Японии для инженерных задач, демонстрирует удовлетворительную точность при описании средних полей скоростей и зон рециркуляции. Однако фундаментальное ограничение данного класса моделей заключается в процедуре осреднения уравнений Навье-Стокса по времени. Эта математическая операция

неизбежно сглаживает нестационарные крупномасштабные вихревые структуры, формирующиеся в зонах отрыва потока за тупыми телами или на наветренных углах высотных доминант. Как следствие, расчёт может занижать пиковые скорости порывов ветра в следе за зданием, что влияет на точность оценки безопасности пешеходов, основанной на экстремальных характеристиках потока.

Для компенсации указанного недостатка в рамках текущей работы применялся эмпирический коэффициент порывистости, связывающий осредненные скорости с вероятными максимальными значениями. Подобная корректировка, безусловно, повышает практическую ценность результатов, но остается приближенной и не учитывает локальную специфику вихреобразования. Перспективным направлением развития вычислительной аэродинамики в градостроительстве становится внедрение методов моделирования крупных вихрей (LES) или гибридных схем, таких как DES. Они способны непосредственно разрешать нестационарные вихревые дорожки и локальные зоны турбулентности, обеспечивая более строгое соответствие физике процесса. Несмотря на существенные вычислительные затраты, использование LES оправдано при детальном анализе критически важных общественных пространств, где сложная структура вихревых потоков влияет на условия использования территории.

Практическая значимость полученных выводов заключается в обосновании конкретных архитектурно-планировочных приемов, способных нивелировать выявленные риски. Моделирование древесных насаждений как пористой среды показало, что продуманное озеленение рассеивает кинетическую энергию потока и снижает среднюю скорость ветра в пешеходных зонах без образования опасных застойных областей. Аналогичным образом работают скосы наветренных граней и организация пористых первых этажей, которые перенаправляют нисходящие потоки и предотвращают их резкий удар о поверхность земли. Внедрение этих решений в регламенты градостроительного

проектирования, подкрепленное вероятностными картами ветрового дискомфорта, позволит целенаправленно формировать комфортный и безопасный микроклимат городских кварталов, минимизируя социальные конфликты на этапе эксплуатации застройки.

Список литературы

1. Оленьков В. Д., Колмогорова А. О., Замула М. Д. Учёт ветрового режима при проектировании жилой застройки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2023. — Т. 23, № 3. — С. 5–13. — DOI: 10.14529/build230301.

2. Hågbo T.-O., Giljarhus K. E. T. Sensitivity of Urban Morphology and the Number of CFD Simulated Wind Directions on Pedestrian Wind Comfort and Safety Assessments // Building and Environment. — 2024. — Vol. 253. — Art. 111310. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111310.

3. Оленьков В. Д., Колмогорова А. О., Кожевников Д. В., Алеманов А. В., Яшкин Я. С. Особенности обтекания воздушным потоком жилой застройки замкнутой формы с арками и разрывами // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2024. — Т. 24, № 4. — С. 5–10. — DOI: 10.14529/build240401.

4. Kubilay A., Rubin A., Derome D., Carmeliet J. Wind-Comfort Assessment in Cities Undergoing Densification with High-Rise Buildings Remediated by Urban Trees // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2024. — Vol. 249. — Art. 105721. — DOI: 10.1016/j.jweia.2024.105721.

5. Гиясов Б. И., Гиясов Р. Б. Влияние тепло-ветрового режима городских территорий на экологию окружающей среды // Экология урбанизированных территорий. — 2023. — № 4. — С. 80–85. — DOI: 10.24412/1816-1863-2023-4-80-85.

6. Raghunathan Srikumar S. K., Cotteleer L., Mosca G., Gambale A., Parente A. Application of a Comprehensive Atmospheric Boundary Layer Model to a Realistic Urban-Scale Wind Simulation // Building and Environment. — 2024. — Vol. 253. —

Art. 111330. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111330.

7. Саиян С. Г., Ефимова А. М. Расчётные аэродинамические исследования комплекса Московского международного делового центра «Москва-Сити» при последовательном возведении зданий // Вестник МГСУ. — 2024. — Т. 19, № 6. — С. 906–941. — DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941.

8. Baş H., Andrianne T., Reiter S. City Configurations to Optimise Pedestrian Level Ventilation and Wind Comfort // Sustainable Cities and Society. — 2024. — Vol. 114. — Art. 105745. — DOI: 10.1016/j.scs.2024.105745.

9. Поддаева О. И., Зубков А. Ф., Храмов Д. А. Обоснование методики экспериментального моделирования пешеходной (биоклиматической) комфортности // Жилищное строительство. — 2025. — № 11. — С. 71–78. — DOI: 10.31659/0044-4472-2025-11-71-78.

10. Silva P. U. da, Bono G., Greco M. Assessing Pedestrian Comfort in Dense Urban Areas Using CFD Simulations: A Study on Wind Angle and Building Height Variations // Fluids. — 2025. — Vol. 10, No. 9. — Art. 233. — DOI: 10.3390/fluids10090233.

11. Цветков О. Ю., Терещенко Т. Ю. Градостроительные решения по смягчению негативных ветровых эффектов на основе CFD-анализа // Московский экономический журнал. — 2025. — Т. 10, № 11. — С. 271–280. — DOI: 10.55186/2413046X_2025_10_11_259.

12. Wu Y., Wang M., Kong F., Kong J., Liu H. Synthesizing the Quantitative Impact of Urban Neighborhood Morphology on Pedestrian Wind Environment: A Meta-Analysis Approach // Sustainable Cities and Society. — 2025. — Vol. 118. — Art. 106053. — DOI: 10.1016/j.scs.2024.106053.

13. Оленьков В. Д., Колмогорова А. О., Замула М. Д., Алеманов А. В. Особенности моделирования ветрового режима проектируемого жилого комплекса // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. — 2026. — № 1 (53). — С. 25–33.

14. Niu J., Mei S.-J., Sun T. Efficient City-Scale Wind Mapping from Building

Morphology: A CFD-Based Parameterization Scheme // Sustainable Cities and Society. — 2025. — Vol. 131. — Art. 106688. — DOI: 10.1016/j.scs.2025.106688.

15. Lee S., Kwon Y. Impact of Building Density and Sky View Factor on Pedestrian-Level Wind Environment in Seoul's Urban Street Canyons // Sustainable Cities and Society. — 2026. — Vol. 136. — Art. 107088. — DOI: 10.1016/j.scs.2025.107088.

16. Chen K., Mo Z., Du Y. Wind Environment and Pedestrian Comfort Assessment Around a High-Rise Building: Coupled Effect of Building Shape and Surrounding Density // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2026. — Vol. 268. — Art. 106297. — DOI: 10.1016/j.jweia.2025.106297.

17. Al-Khalidy N. H. On the Assessment of Wind Microclimate in a Complex Urban Environment Utilising Computational Fluid Dynamics // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. — 2024. — Vol. 19. — P. 282–295. — DOI: 10.37394/232013.2024.19.26.

18. Jareemit D., Chauytong T., Liu J., Tanapant S., Srivanit M. Impact of Urban Spatial Configurations on Pedestrian Wind Comfort and Ventilation Effectiveness in Complex High-Density Urban Blocks // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. — 2026. — Опубликовано онлайн 31 августа 2026 г. — DOI: 10.1080/13467581.2026.2722086.

19. Li J., Du Y., Liu J., Niu J., Mak C. M., Kwok K. C. S. From Isolated Voids to Integrated Systems: A Systematic Review of Building Lift-Up Design as Thermal Comfort Hubs Integrated with Urban Ventilation Corridors // Building and Environment. — 2026. — Vol. 295. — Art. 114470. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2026.114470.

References

1. Olen`kov V. D., Kolmogorova A. O., Zamula M. D. Uchyot vetrovogo rezhima pri proektirovanii zhiloj zastrojki // Vestnik Yuzhno-Ural`skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. — 2023. — T. 23, № 3. — S. 5–13. — DOI: 10.14529/build230301.

2. Hågbo T.-O., Giljarhus K. E. T. Sensitivity of Urban Morphology and the Number

of CFD Simulated Wind Directions on Pedestrian Wind Comfort and Safety Assessments // Building and Environment. — 2024. — Vol. 253. — Art. 111310. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111310.

3. Olen`kov V. D., Kolmogorova A. O., Kozhevnikov D. V., Alemanov A. V., Yashkin Ya. S. Osobennosti obtekaniya vozdushny`m potokom zhiloj zastrojki zamknutoj formy` s arkami i razry`vami // Vestnik Yuzhno-Ural`skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel`stvo i arxitektura. — 2024. — T. 24, № 4. — S. 5–10. — DOI: 10.14529/build240401.

4. Kubilay A., Rubin A., Derome D., Carmeliet J. Wind-Comfort Assessment in Cities Undergoing Densification with High-Rise Buildings Remediated by Urban Trees // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2024. — Vol. 249. — Art. 105721. — DOI: 10.1016/j.jweia.2024.105721.

5. Giyasov B. I., Giyasov R. B. Vliyanie teplo-vetrovogo rezhima gorodskix territorij na e`kologiyu okruzhayushhej sredy` // E`kologiya urbanizirovanny`x territorij. — 2023. — № 4. — S. 80–85. — DOI: 10.24412/1816-1863-2023-4-80-85.

6. Raghunathan Srikumar S. K., Cotteleer L., Mosca G., Gambale A., Parente A. Application of a Comprehensive Atmospheric Boundary Layer Model to a Realistic Urban-Scale Wind Simulation // Building and Environment. — 2024. — Vol. 253. — Art. 111330. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111330.

7. Saiyan S. G., Efimova A. M. Raschyotny`e ae`rodinamicheskie issledovaniya kompleksa Moskovskogo mezhdunarodnogo delovogo centra «Moskva-Siti» pri posledovatel`nom vozvedenii zdanij // Vestnik MGSU. — 2024. — T. 19, № 6. — S. 906–941. — DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.906-941.

8. Baş H., Andrianne T., Reiter S. City Configurations to Optimise Pedestrian Level Ventilation and Wind Comfort // Sustainable Cities and Society. — 2024. — Vol. 114. — Art. 105745. — DOI: 10.1016/j.scs.2024.105745.

9. Poddaeva O. I., Zubkov A. F., Xramov D. A. Obosnovanie metodiki e`ksperimental`nogo modelirovaniya peshexodnoj (bioklimaticheskoj) komfortnosti // Zhilishhnoe stroitel`stvo. — 2025. — № 11. — S. 71–78. — DOI: 10.31659/0044-

4472-2025-11-71-78.

10. Silva P. U. da, Bono G., Greco M. Assessing Pedestrian Comfort in Dense Urban Areas Using CFD Simulations: A Study on Wind Angle and Building Height Variations // Fluids. — 2025. — Vol. 10, No. 9. — Art. 233. — DOI: 10.3390/fluids10090233.

11. Czvetkov O. Yu., Tereshhenko T. Yu. Gradostroitel`ny`e resheniya po smyagcheniyu negativny`x vetrovy`x e`ffektov na osnove CFD-analiza // Moskovskij e`konomicheskij zhurnal. — 2025. — T. 10, № 11. — S. 271–280. — DOI: 10.55186/2413046X_2025_10_11_259.

12. Wu Y., Wang M., Kong F., Kong J., Liu H. Synthesizing the Quantitative Impact of Urban Neighborhood Morphology on Pedestrian Wind Environment: A Meta-Analysis Approach // Sustainable Cities and Society. — 2025. — Vol. 118. — Art. 106053. — DOI: 10.1016/j.scs.2024.106053.

13. Olen`kov V. D., Kolmogorova A. O., Zamula M. D., Alemanov A. V. Osobennosti modelirovaniya vetrovogo rezhima proektiruemogo zhilogo kompleksa // Biosfernaya sovmestimost`: chelovek, region, texnologii. — 2026. — № 1 (53). — S. 25–33.

14. Niu J., Mei S.-J., Sun T. Efficient City-Scale Wind Mapping from Building Morphology: A CFD-Based Parameterization Scheme // Sustainable Cities and Society. — 2025. — Vol. 131. — Art. 106688. — DOI: 10.1016/j.scs.2025.106688.

15. Lee S., Kwon Y. Impact of Building Density and Sky View Factor on Pedestrian-Level Wind Environment in Seoul's Urban Street Canyons // Sustainable Cities and Society. — 2026. — Vol. 136. — Art. 107088. — DOI: 10.1016/j.scs.2025.107088.

16. Chen K., Mo Z., Du Y. Wind Environment and Pedestrian Comfort Assessment Around a High-Rise Building: Coupled Effect of Building Shape and Surrounding Density // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2026. — Vol. 268. — Art. 106297. — DOI: 10.1016/j.jweia.2025.106297.

17. Al-Khalidy N. H. On the Assessment of Wind Microclimate in a Complex Urban Environment Utilising Computational Fluid Dynamics // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. — 2024. — Vol. 19. — P. 282–295. — DOI:

10.37394/232013.2024.19.26.

18. Jareemit D., Chauytong T., Liu J., Tanapant S., Srivanit M. Impact of Urban Spatial Configurations on Pedestrian Wind Comfort and Ventilation Effectiveness in Complex High-Density Urban Blocks // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. — 2026. — Опубликовано онлайн 31 августа 2026 г. — DOI: 10.1080/13467581.2026.2722086.

19. Li J., Du Y., Liu J., Niu J., Mak C. M., Kwok K. C. S. From Isolated Voids to Integrated Systems: A Systematic Review of Building Lift-Up Design as Thermal Comfort Hubs Integrated with Urban Ventilation Corridors // Building and Environment. — 2026. — Vol. 295. — Art. 114470. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2026.114470.

Статья поступила в редакцию 20.08.2026; одобрена после рецензирования 18.09.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 20.08.2026; approved after peer review 18.09.2026; accepted for publication 08.10.2026.