

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-33-40

Воробьева Ю.А., Михайлова Т.В., Бурак Е.Э.Воронежский государственный технологический университет***E-mail: cccp38@yandex.ru*

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ПОТОКОВ В ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКЕ

Аннотация. Статья посвящена моделированию ветровых потоков при размещении новых строительных объектов в сложившейся застройке. В работе использовались технологии CFD (вычислительной гидрогазодинамики, *computation fluid dynamics*) для оценки влияния ветра, определения направления векторов скорости воздушных потоков при заданном расположении и геометрических характеристиках зданий, рельефа земной поверхности. При решении задач моделирования ветровых потоков на территории жилой застройки был проведен обзор инструментов для архитектурно-климатического анализа, описаны возможности расчета каждого из них, выделены достоинства и недостатки. Сделан вывод, что большая часть инструментов остается проприетарной и не интегрированной в основные программы для архитектурного и градостроительного проектирования. Описываются основные этапы моделирования и получения исходных данных для CFD-анализа: цифровые модели рельефа местности и застройки, полученные на основании геоинформационной модели города, годовые данные о фактическом направлении и скорости ветра в районе исследования. Получены значения скоростей, ветра для рассматриваемой жилой группы, траектории его движения в застройке, спроецированные на вертикальные и горизонтальные плоскости. Результаты моделирования позволяют рассматривать мероприятия по планированию и благоустройству городского пространства и снижению негативного воздействия ветра на застраиваемой территории.

Ключевые слова: микроклимат жилой застройки, ветровой режим, CFD -моделирование.

Введение. Создание благоприятного ветрового режима при проектировании городской застройки является одной из основных задач климатического анализа местности. При этом при реконструкции застройки и строительстве новых зданий не всегда проводятся расчеты по оценке влияния ветра на окружающую территорию. Годовой анализ ветра обычно не используется при проектировании застройки, так как требует значительного времени предварительной обработки исходных данных. Микроклиматические условия городских районов неразрывно связаны с характером и формой застройки, озеленением и ландшафтом территории [1–6]. Воздействие зданий, как трехмерных элементов, на изменение скорости и направления ветра, особенно в составе застройки отдельных планировочных зон, должно учитываться в расчетах аэрации городов. Подобный расчет должен иметь прикладной характер и получение практических результатов необходимо упростить с использованием специальных программ для гидродинамики [7–11]. Важно учитывать аэрационный режим, как естественное проветривание застройки с целью предупреждения ее загазованности, так и возможное неблагоприятное воздействие воздушных потоков с точки зрения создаваемого микроклимата в дворовых пространствах и ветрового давления на здания.

Учет ветрового режима в архитектурно – климатическом анализе необходим при решении следующих задач [12–15]:

- воздействие ветрового давления на здания и сооружения;
- оценка зон застоя воздуха при учете инженерно-транспортной инфраструктуры, сопровождающейся загрязнением воздушного бассейна (зоны со скоростью воздушного потока до 3 м/с и штиль);
- защита жилой застройки от сильного проветривания (более 5 м/с) при расчете комфортного пребывания человека;
- размещения элементов дворовых пространств, озеленения, площадок, парковок.

Исследование процесса обтекания ветровым потоком различных форм рельефа и градостроительных объектов позволяет получить оценку ветрового воздействия на определенных территориях и на ее основе разработать ряд рекомендаций по улучшению аэрационного режима застройки [16].

Целью исследований является анализ ветровых потоков жилой застройки, выполненный различными инструментами для климатического анализа территории. В связи с этим был выбран строящийся объект в г. Воронеж, позволяющий оценить аэрационный режим застройки и сравнить результаты моделирования с реальной ситуацией. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: проанализировать доступность и возможность свободного использования плагинов и программ для CFD моделирования; смоделировать ветровой режим застройки и срав-

нить полученный результат с натурными замерами в определенных точках; оценить необходимость использования цифрового моделирования при размещении жилых групп, благоустройстве и реконструкции застройки.

Материалы и методы. Для оценки влияния ветра на планируемую застройку авторами были проанализированы плагины и программы, позволяющие использовать CFD моделирование (computation fluid dynamics). Платформы с открытым исходным кодом, такие как Grasshopper и

Dynamo и их различные плагины появились как интерфейс, позволяющий выполнять инженерные расчеты и визуальное программирование архитекторами, работающими в программах Rhino и Revit соответственно. Эти новые инструменты сделали эксперименты и дизайн современными, а метеорологические параметры более доступными. Наиболее часто используемыми программными продуктами являются Ladybug, ENVI-met, SimScale и Eddy3D, чьи выходные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ программных продуктов по расчету микроклимата

Программное обеспечение	Возможности расчета	Выходные данные
Ladybug v1.4.0 (www.ladybug.tools)	Визуализация данных о погоде и солнечной энергии, моделирование солнечного излучения, движение воздуха внутри помещения	Часы и время инсоляции, солнечное излучение
ENVI-met (www.envi-met.com)	Моделирование наружного микроклимата, количественная оценка теплового комфорта	Температура воздуха, скорость ветра, влажность, средняя радиационная температура
SimScale (www.simscale.com)	CFD моделирование ветрового потока, моделирование ветрового комфорта	Скорость ветра, господствующий ветер, критерии комфорта
Eddy3D (www.eddy3d.com)	CFD-моделирование ветрового потока	Скорость ветра, универсальный термальный климатический индекс (UTCI) давление ветра на фасадах зданий, средняя радиационная температура
ANSYS CFD (Fluent)	CFD-моделирование ветровых нагрузок	Поле давления, аэродинамические коэффициенты, данные о профиле скорости в характерных сечениях

Ladybug – это плагин для анализа окружающей среды с открытым исходным кодом для Grasshopper интерфейса Rhino не совсем стабильно работает для наружных пространств.

ENVI-met – это целостное программное обеспечение для моделирования микроклимата, способное имитировать ветровое обтекание зданий, теплопередачу строительных поверхностей, эвапотранспирацию и отражение, передачу, поглощение и пропускание солнечного излучения вообще. Поток ветра моделируется с помощью уравнения Навье-Стокса (RANS). Препятствием для более широкого внедрения программы в рабочие процессы проектирования являются такие ограничения, как стоимость, знания в области программирования, необходимость огромных вычислительных мощностей и длительное время моделирования.

SimScale – это облачная платформа CFD, способная отображать годовой ход ветра и процессы обтекания зданий ветром. Может загружать геометрические параметры объектов из программ САПР, но результаты не могут импортироваться обратно, поэтому это программное обеспечение также остается ограниченным. Среди преимуществ SimScale – быстрое время вычисле-

ний для годовых симуляций, позволяющее идентифицировать несколько критических состояний в течение года.

Eddy3D – это плагин для имитации воздушного потока и микроклимата для Grasshopper. Он использует OpenFOAM и файлы погоды EPW для прогнозирования годового хода ветра. Результаты легко настраиваются в Grasshopper и Rhino, обеспечивающих точный контроль над визуализацией. Eddy3D является примером доступного и простого в использовании инструмента проектирования CFD в Rhino/Grasshopper, в настоящее время он поддерживает только анализ ветра на открытом воздухе. Плагин Eddy3d для Grasshopper позволяет выполнять как простой просчет ветровых потоков, так и годовой расчет движения ветра с множественным направлением движения и получить коэффициент давления на фасады здания.

ANSYS CFD (Fluent) – программа для расчета ветровых нагрузок. Требуется проведения большой подготовительной работы для создания геометрической модели местности в CAD формате (рельеф, архитектура), граничных условий для моделирования на стенках и пристеночной зоны. Подходит для расчета аэродинамики уже готовой концепции застройки, созданной во

внешних программах. Для каждого нового расчетного случая требуется перестраивать расчетную область и начинать перестраивать сетку сначала, что усложняет процесс моделирования. Для задания сложных граничных условий требуется навык программирования на языке Python. Препятствием для более широкого внедрения программы в рабочие процессы проектирования являются также высокая стоимость.

Основная часть. Для анализа изменения ветровых потоков в жилой застройке рассмотрим

этапы моделирования ветрового режима на примере построенного жилого комплекса в городе Воронеж. Особенностью исследования является наблюдение ветрового режима в годовом периоде при различных изменениях этажности и конфигурации здания. Комплекс представляет собой 19 и 25 этажные здания, примыкающие к улицам Красноармейская и Станкевича и окруженные малоэтажной и средней этажности застройкой (рис. 1).

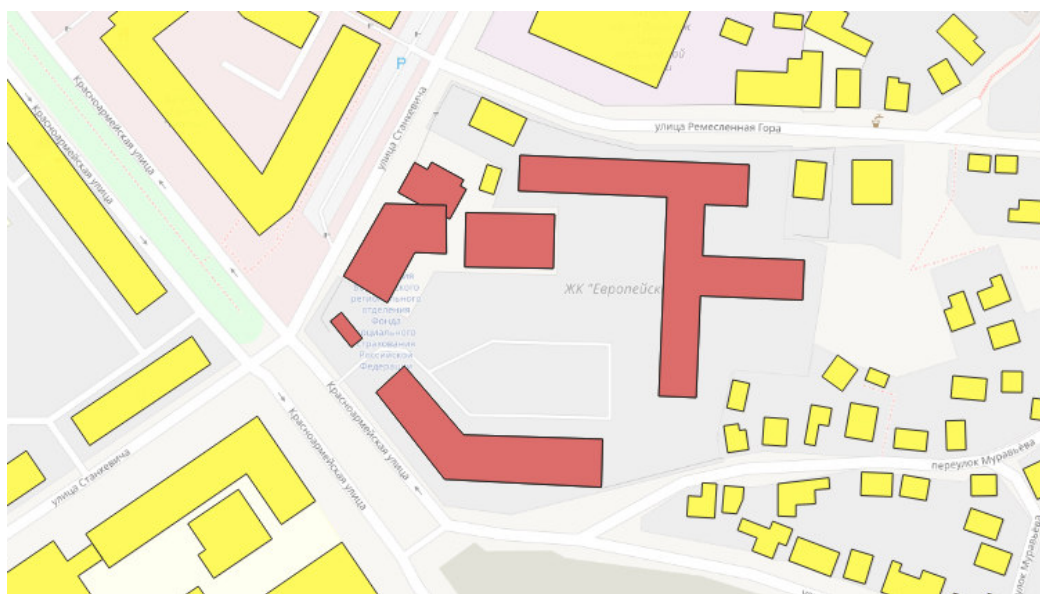


Рис. 1. Жилая застройка для моделирования ветровых потоков на пересечении ул. Станкевича и Красноармейской

Район исследования располагается в правобережной части города на склоне протяженностью около 35 м, спускающемся к водохранилищу. С восточной части участка размещен частный сектор со зданиями 1–2 этажа. Основы расчета ветровых потоков выполнены при помощи плагина Eddy3d для Grasshopper и движка CFD Blue Core (рис. 2). Плагин позволяет задавать исходные данные по рельефу, застройке и климатическим параметрам и делать предварительные просчеты, далее с помощью CFD Blue Core выполняются более сложные расчеты параметров ветра на ограниченном участке.

Наиболее важным этапом CFD-моделирования является геометрически корректное отображение реальной местности, так как ветер подвержен наиболее сильному воздействию со стороны рельефа, озеленения и изменения высоты застройки. Информация о рельефе выгружалась из общедоступных цифровых моделей территорий на основе снимков SRTM (Shuttle radar topographic mission) с помощью плагина Heron. Сведения о геометрических параметрах будущей застройки получены из открытых карт с портала

Open Street Map с присвоением высотных характеристик с помощью программы Qgis. Ветровой режим оценивался на основе данных по годовой повторяемости направлений ветра. В расчетах также была использована информация о скорости и направлении ветра в районе исследования с сайта windy.com.

Моделирование ветровых потоков для жилой застройки включало пять шагов построения. Первым этапом моделирования ветра в Grasshopper является привязка геометрии и границ территории, загрузка рельефа и установка необходимых значений фонового ветрового потока. Расчет позволяет автоматически загружать данные о погоде – в формате *.erw (для имитационной модели, а также данные о скорости и направлении ветра).

Следующий шаг касается установки области расчета в виде обычного бокса. Для моделирования окружающей среды CFD в качестве области моделирования считается лучшей практикой использовать форму бокса. Однако данная форма имеет недостатки, когда речь идет о моделировании воздушного потока с несколькими направлениями ветра: может потребоваться повторная

сетка и дополнительные этапы предварительной обработки, что может потребовать значительных временных ограничений. Моделирование в Grasshopper позволяет также создавать цилиндрическую вычислительную сетку, упрощающую моделирование произвольных направлений ветра. Для предварительных расчетов и сокращения времени вычисления в работе применена сетка в форме бокса.

Следующий этап моделирования – настройка локации расчета и выполнение симуляции построения векторов скорости ветра в заданных плоскостях. Расчеты проводятся в вертикальных и горизонтальных плоскостях. Данный этап включает множественные вычисления и повторение итераций с учетом розы ветров. Полученные данные отправляются в CFD Blue Core для наглядного отображения результатов расчета в объеме и возможности корректировки вычислений.

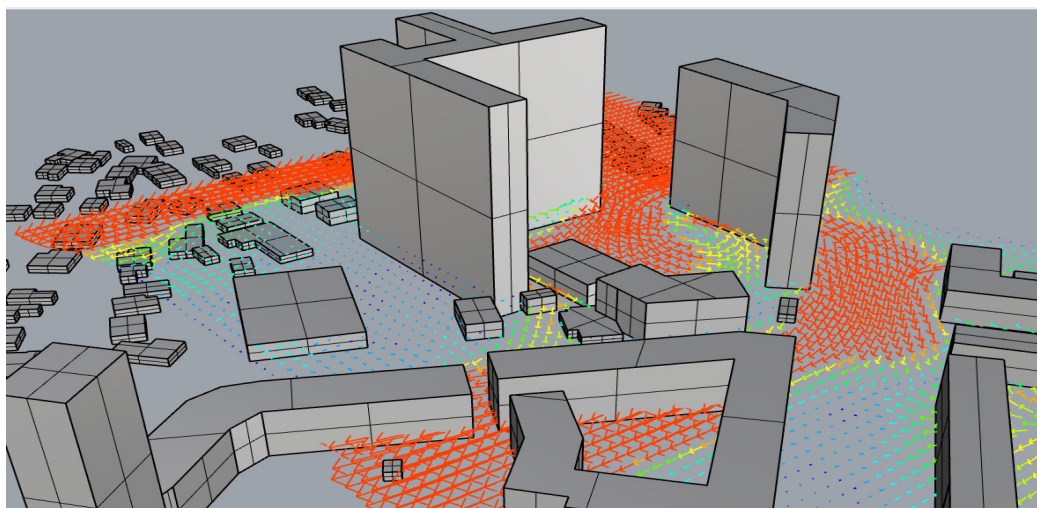


Рис. 2. CFD-модель ветровых потоков в жилой застройке, полученная с помощью плагина Eddy3D

После ряда симуляций при различных исходных фоновых направлениях и скоростях воздушного потока были получены значения векторов скорости ветра вокруг возводимых зданий. Моделирование включало симуляцию вариантов по румбам направления движения ветра. Скорость принималась от минимальной (1–3 м/с), характерной для теплого периода года до максимальной, равной 21 м/с, характерной для холодного периода. Несмотря на то, что в целом для города Воронеж господствующим направлением ветра является западное, моделирование показало, что для данной застройки наихудшими вариантами являются направления южное, юго-восточное и северо-западное.

Для наглядного отображения результатов расчета, данные, полученные с помощью Eddy3D, были интегрированы в CFD Blue Core (рис. 3). Данный переход позволяет получить точки со значениями скоростей ветра в м/с и определить наиболее ветреные места и места застойных зон. Результат аэрационного режима для рассматриваемой жилой группы представлен при ветре южного направления со скоростью 6–9 м/с и сопоставим со значениями, полученными в натуральных условиях, что позволяет использовать плагин для моделирования строящихся объектов. Для сравнения результатов цифровой модели с

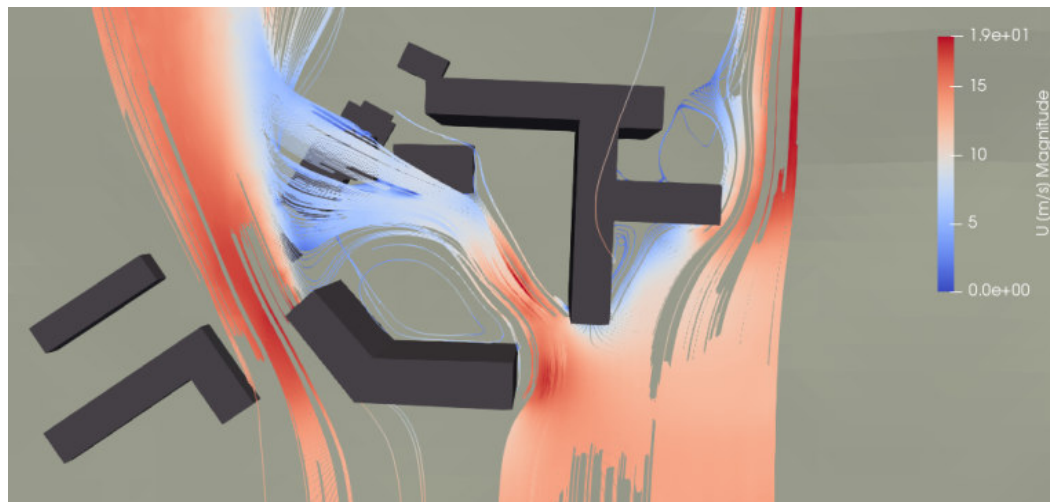
фактическими значениями были произведены замеры скорости движения воздуха анемометром и определено его направление в характерных точках расчетной области дворового пространства на уровне дыхания человека (на высоте 1,5 м) в холодный период года. Полученное поле скоростей было наложено на схему моделирования при тех же условиях для сравнения. Расхождение в среднем не превышает 10 %, лишь в некоторых точках составило до 1–2 м/с. Отклонения теоретических и экспериментальных значений связаны с неучтенными в модели элементами благоустройства и ограждениями.

Наглядное отображение траектории ветровых потоков позволяет разместить с наибольшим комфортом места отдыха жителей и парковки автомобилей без вредного влияния на экологическое состояние территории. При этом необходимо учесть появление замкнутого вихревого потока, циркулирующего в угловых пространствах двора данного жилого комплекса. Данное обстоятельство в летний период года потребует дополнительных мер по созданию благоприятного микроклимата (навесы, озеленение и другие мероприятия). В целях защиты территории от сильных ветров рекомендуется использовать вертикальные объекты благоустройства, элементы озеленения, а также использовать данный фактор

для снижения загазованности улиц и размещения парковок автомобилей.

Как показывают исследования, влияние рельефа, геометрических параметров застройки на поведение воздушного потока в уличном пространстве является существенным. Свободные приемы планировки, расположение под углом к

линии застройки, увеличение отступа от проезжей части, чередование этажности и изменение конфигурации в плане влияет на изменение скорости и направления ветра. Все это указывает на необходимость применения цифрового моделирования при размещении и реконструкции объектов городской среды.



б)

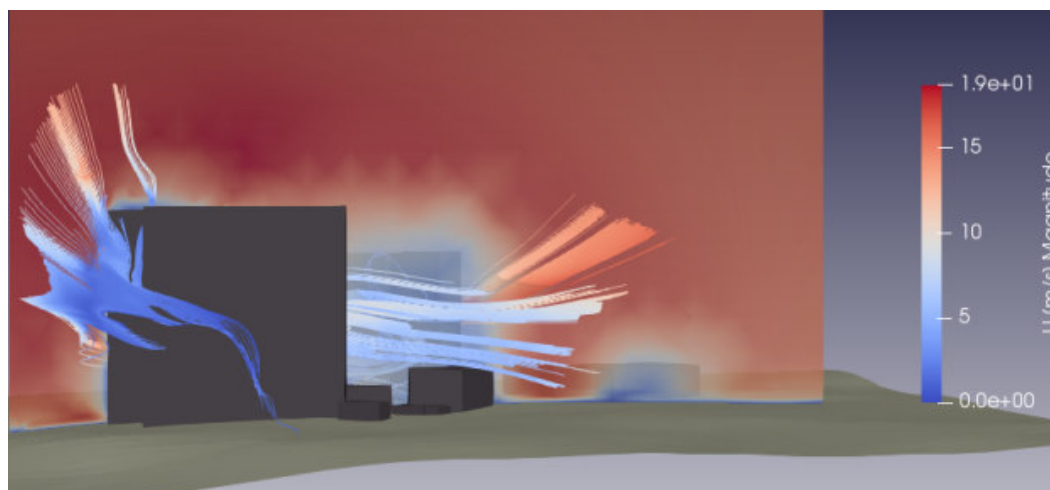


Рис. 3. Отображение ветровых потоков с градацией по скорости от 0 до 19 м/с (а) в горизонтальной, (б) вертикальной плоскостях

Планирование нового строительства и реконструкция существующих объектов должно осуществляться с анализом годового хода ветра и окружающего ландшафта, создающих особые условия на отдельных участках. Предварительные результаты моделирования в процессе архитектурного проектирования могут улучшить тепловой комфорт в стоящихся объектах, ветровой режим на открытых дворовых пространствах, улицах и патио. Подобный расчет должен иметь прикладной характер, а получение практических результатов необходимо упрощать с использованием специальных программ для гидродинамики.

Выводы

1. Выявлено наличие достаточно большого количества плагинов, разработанных для целей CFD-моделирования, позволяющих проводить архитектурно-климатический анализ. Обзор инструментов для анализа микроклимата показал, что большая часть программного обеспечения остается проприетарным и не интегрированным в основные программы для проектирования. Из рассмотренных авторами в статье существующих программных разработок плагин Eddy3D выделен как доступный и простой в использовании инструмент.

2. В результате компьютерного моделирования застройки были получены траектория и скорость движения воздушных потоков, участки

сильных ветров и застойные зоны. Особенностью исследования является наблюдение ветрового режима в годовом периоде при различных изменениях этажности и конфигурации здания. Результаты цифровой модели ветровых потоков сопоставимы со значениями, полученными в результате натурных измерений, что позволяет рекомендовать рассмотренный программный комплекс для моделирования строящихся объектов для обоснования мероприятий по планированию и благоустройству городского пространства, снижению негативного воздействия ветра на застраиваемой территории.

3. Обоснована необходимость использования цифрового моделирования при размещении жилых групп, благоустройстве и реконструкции застройки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исанова А.В., Попова И.В. Обеспечение требуемых характеристик внутреннего микроклимата при проектировании квартальной многоэтажной жилой застройки с учётом её аэрационного режима // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 1 (35). С. 25–29.
2. Попова И.В., Любимова Е.В., Куролап С.А. Вычисление параметров шероховатости и оценка аэрационного потенциала городских территорий // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2018. № 1 (4). С. 79–87.
3. Харченко С.В. Опыт количественной оценки влияния рельефа на аэрацию городской застройки // Геоморфология. 2016. № 3. С. 45–51. doi: 10.15356/0435-4281-2016-3-45-51
4. Максимова О.И. Саенко Н.А. Оценка влияния жилой застройки на аэрационный режим центрального района г. Братска // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 5. С. 41–43.
5. Шукуров И.С., Оленьков В.Д., Пайкан В., Аманов Р.М. Обеспечение экологической безопасности городов с учетом аэрационного режима воздуха // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 41–44. doi: 10.12737/article_590878faafb818.60730967
6. Воробьева Ю.А. Мизилина Е.Г. Экологический аспект реконструкции исторически сложившейся застройки по улице Сакко и Ванцетти городского округа г. Воронеж // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. 2017. № 1. С. 80–83.
7. Бухаров, Д.Н. Применение моделирования аэрации городской застройки в целях экологической безопасности // В сборнике: Безопасность городской среды. Материалы VIII Международной научно-практической конференции. Омск, 2021. С. 103–107.
8. Kastner P.A., Dogan T. Cylindrical meshing methodology for annual urban computational fluid dynamics simulations. *Journal of Building Performance Simulation*. 2019. 13(1). Pp. 59–68. doi:10.1080/19401493.2019.1692906
9. Kastner P., Dogan T. Predicting space usage by multi-objective assessment of outdoor thermal comfort around a university campus. *Proceedings of SimAUD 2020*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/346039200>
10. Оленьков В.Д., Колмогорова А.О., Сапогова А.Е. Компьютерное моделирование аэрационного режима жилой застройки с целью проветривания и ветрозащиты // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Т. 21. № 1. С. 5–12. doi: 10.14529/build210101
11. Оленьков В.Д. Учет ветрового режима городской застройки при градостроительном планировании с использованием технологий компьютерного моделирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. Т. 17. № 4. С. 21–27. doi: 10.14529/build170403
12. Силина Ю.А., Тишина Е.В., Коростелева Н.В. Важность учета микроклиматических параметров при благоустройстве дворовых пространств многоквартирных домов // В сборнике: Актуальные вопросы естествознания. материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2019. С. 262–268.
13. Дуничкин И.В., Хамад М.М.Х. Взаимосвязь аэрационного режима и привлекательности внешнего благоустройства жилой застройки в жарком сухом климате // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 5 (83). С. 34–36.
14. Балакин В.В., Сидоренко В.Ф. Трансформация воздушного потока при обтекании жилых зданий на городских улицах // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. № 44-2 (63). С. 4–18.
15. Грибач Ю.С., Модестов К.А., Лескова Л.В. Расчетные исследования ветрового воздействия при выполнении анализа аэрационного режима территории жилой застройки // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2018. № 8 (1008). С. 50–51.
16. Оленьков В.Д., Пронина А.А. Оценка аэрационного режима города при решении проблем градостроительной безопасности // Градостроительство. 2014. № 6 (34). С. 37–41.

Информация об авторах

Воробьева Юлия Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры жилищно-коммунального хозяйства. E-mail: cccp38@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. ул. 20-летия Октября, д. 84

Михайлова Татьяна Витальевна, кандидат архитектуры, доцент кафедры жилищно-коммунального хозяйства. E-mail: mtvit.1955@mail.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. ул. 20-летия Октября, д. 84

Бурак Екатерина Эдуардовна, кандидат технических наук, доцент кафедры жилищно-коммунального хозяйства. E-mail: burak.e@mail.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. ул. 20-летия Октября, д. 84

Поступила 23.01.2022 г.

© Воробьева Ю.А., Михайлова Т.В., Бурак Е.Э., 2022

**Vorob'eva Yu.A., Mikhailova T.V., Burak E.E.
Voronezh State Technological University Russia,
E-mail: cccp38@yandex.ru

DIGITAL SIMULATION OF WIND FLOWS IN RESIDENTIAL BUILDINGS

Abstract. *The article is devoted to the modeling of wind flows when placing new construction objects in the existing building. The CFD technologies are used (computational fluid dynamics) to assess the influence of wind, to determine the direction of airflow velocity vectors for a given location and geometric characteristics of buildings, the earth's surface topography. When solving the problems of modeling wind flows in a residential area, a review of tools for architectural and climatic analysis is carried out. In addition, the possibilities of calculating each of them are described, and advantages and disadvantages are highlighted. It is concluded that most of the tools remain proprietary and not integrated into the main programs for architectural and urban design. The main stages of modeling and obtaining initial data for CFD analysis are described: digital models of the terrain and buildings obtained on the basis of a geoinformation model of the city, annual data on the actual direction and speed of the wind in the study area. The values of speeds, wind for the residential group under consideration, the trajectories of its movement in the building, projected onto vertical and horizontal planes are obtained. The simulation results allow to consider measures for planning and beautification of urban space and reducing the negative impact of wind on the built-up area.*

Keywords: *residential building microclimate, wind regime, CFD modeling.*

REFERENCES

1. Isanova A.V., Popova I.V. Ensuring the required characteristics of the internal microclimate when designing a quarterly multi-storey residential building, taking into account its aeration regime [Obespecheniye trebuyemykh kharakteristik vnutrennego mikroklimata pri proyektirovanii kvartal'noy mnogoetazhnoy zhiloy zastroyki s uchotom yeyo aeratsionnogo rezhima]. 2021. No. 1 (35). Pp. 25–29. (rus)
2. Popova I.V., Lyubimova E.V., Kurolap S.A. Calculation of roughness parameters and assessment of the aeration potential of urban areas [Vychisleniye parametrov sherokhovatosti i otsenka aeratsionnogo potentsiala gorodskikh territoriy]. Housing and communal infrastructure. 2018. No. 1 (4). Pp. 79–87. (rus)
3. Kharchenko S.V. Experience in quantitative assessment of the influence of the relief on the aeration of urban development [Opyt kolichestvennoy otsenki vliyaniya rel'yefa na aeratsiyu gorodskoy zastroyki]. Geomorphology. 2016. No. 3. Pp. 45–51. doi: 10.15356/0435-4281-2016-3-45-51 (rus)
4. Maksimova O.I., Saenko N.A. Assessment of the impact of residential development on the aeration regime of the central district of the city of Bratsk [Otsenka vliyaniya zhiloy zastroyki na aeratsionnyy rezhim tsentral'nogo rayona g. Bratska]. Modern science-intensive technologies. 2005. No. 5. Pp. 41–43. (rus)
5. Shukurov I.S., Olenkov V.D., Paykan V., Amanov R.M. Ensuring the environmental safety of cities, taking into account the aeration regime of air [Obespecheniye ekologicheskoy bezopasnosti gorodov s uchotom aeratsionnogo rezhima vozdukh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 5. Pp. 41–44. doi:10.12737/article_590878faafb818.60730967 (rus)
6. Vorob'eva Yu.A., Mizilina E.G. Ecological aspect of the reconstruction of historical buildings along Sacco and Vanzetti Street in the city district of Voronezh [Ekologicheskiy aspekt rekonstruktsii istoricheskikh slozhivsheysya zastroyki po ulitse Sacco i Vantsetti gorodskogo okruga g. Voronezh]. Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: High technologies. Ecology. 2017. No. 1. Pp. 80–83. (rus)

7. Bukharov D.N. Application of urban aeration modeling for environmental safety [Primeneniye modelirovaniya aeratsii gorodskoy zastroyki v tselyakh ekologicheskoy bezopasnosti] In the collection: Safety of the urban environment. Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference. Omsk, 2021. Pp. 103–107. (rus)

8. Kastner P.A., Dogan T. Cylindrical meshing methodology for annual urban computational fluid dynamics simulations. *Journal of Building Performance Simulation*. 2019. 13(1). Pp. 59–68. doi:10.1080/19401493.2019.1692906 (rus)

9. Kastner P., Dogan T. Predicting space usage by multi-objective assessment of outdoor thermal comfort around a university campus. *Proceedings of SimAUD 2020*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/346039200>

10. Olenkov V.D., Kolmogorova A.O., Sapogova A.E. Computer modeling of the aeration regime of residential buildings for the purpose of ventilation and wind protection [Komp'yuternoye modelirovaniye aeratsionnogo rezhima zhiloy zastroyki s tsel'yu provetrivaniya i vetrozashchity]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and architecture*. 2021. Vol. 21. No. 1. Pp. 5–12. doi:10.14529/build210101 (rus)

11. Olenkov V.D. Accounting for the wind regime of urban development in urban planning using computer modeling technologies [Uchet vetrovogo rezhima gorodskoy zastroyki pri gradostroitel'nom planirovanii s ispol'zovaniyem tekhnologiy komp'yuternogo modelirovaniya]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and architecture*. 2017. Vol. 17. No. 4. Pp. 21–27. doi:10.14529/build170403 (rus)

12. Silina Yu.A., Tishina E.V., Korosteleva N.V. The importance of taking into account microclimatic parameters in the improvement of the yard

spaces of apartment buildings [Vazhnost' ucheta mikroklimaticheskikh parametrov pri blagoustroystve dvorovykh prostranstv mnogokvartirnykh domov]. In the collection: Topical issues of natural science. materials of the IV All-Russian scientific-practical conference with international participation. 2019. Pp. 262–268. (rus)

13. Dunichkin I.V., Khamad M.M.Kh. Interrelation of the aeration regime and the attractiveness of the external improvement of residential buildings in a hot dry climate [Vzaimosvyaz' aeratsionnogo rezhima i privlekatel'nosti vneshnego blagoustroystva zhiloy zastroyki v zharkom sukhom klimate]. *Science and business: ways of development*. 2018. No. 5 (83). Pp. 34–36. (rus)

14. Balakin V.V., Sidorenko V.F. Transformation of the air flow when flowing around residential buildings on city streets [Transformatsiya vozdušnogo potoka pri obtekanii zhilykh zdaniy na gorodskikh ulitsakh]. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture*. 2016. No. 44–2 (63). Pp. 4–18. (rus)

15. Gribach Yu.S., Modestov K.A., Leskova L.V. Computational studies of wind exposure when performing an analysis of the aeration regime of a residential area [Raschetnyye issledovaniya vetrovogo vozdeystviya pri vypolnenii analiza aeratsionnogo rezhima territorii zhiloy zastroyki]. *BST: Bulletin of construction equipment*. 2018. No. 8 (1008). Pp. 50–51. (rus)

16. Olenkov V.D., Pronina A.A. Evaluation of the aeration regime of the city in solving the problems of urban safety [Otsenka aeratsionnogo rezhima goroda pri reshenii problem gradostroitel'noy bezopasnosti]. *Urban planning*. 2014. No. 6 (34). Pp. 37–41. (rus)

Information about the authors

Vorob'eva Yuliya A. PhD. E-mail cccp38@yandex.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, st. 20th anniversary of October, 84.

Mikhailova Tatyana V. PhD. E-mail mtvit.1955@mail.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, st. 20th anniversary of October, 84.

Burak Ekaterina E. PhD. E-mail burak.e@mail.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, st. 20th anniversary of October, 84.

Received 23.01.2022

Для цитирования:

Воробьева Ю.А., Михайлова Т.В., Бурак Е.Э. Цифровое моделирование ветровых потоков в жилой застройке // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 5. С. 33–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-33-40

For citation:

Vorob'eva Yu.A., Mikhailova T.V., Burak E.E. Digital simulation of wind flows in residential buildings. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 5. Pp. 33–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-5-33-40