

DOI: 10.17516/1999-494X-0398

УДК 504.35

SigmaFlow as a Tool for Studying Wind Comfort in Urban Environment

Viktoriya D. Meshkova^{*a}, Aleksandr A. Dekterev^{a, b},
Sergej A. Filimonov^{a, b} and Kirill Yu. Litvintsev^b

^a*Siberian Federal University*

Krasnoyarsk, Russian Federation

^b*Institute of Thermophysics S. S. Kutateladze SB RAS*

Krasnoyarsk Branch

Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 15.03.2022, received in revised form 27.04.2022, accepted 25.05.2022

Abstract. The intensive growth of modern cities leads to the construction of residential microdistricts with a dense arrangement of buildings of various heights. Such architectural solutions contribute to an unpredictable change in the aeration regime of the territory, which can lead to a deterioration in the ecological situation of the city, as well as to the formation of uncomfortable conditions in the area of human presence. To study the mechanisms of formation of these conditions and forecasting of the wind regime, a microscale model of the atmosphere of the city, implemented in the SigmaFlow program, is used. The paper presents the results of verification of a numerical model with experimental data on two test problems of flow around model elements of urban development. The obtained calculation results demonstrate a fairly good agreement with the experimental data. In addition, an analysis was made of the formation of wind conditions in a real residential area. Characteristic flow structures were obtained when flowing around buildings, and places of formation of uncomfortable and dangerous zones for human stay were identified.

Keywords: building aerodynamics, numerical simulation, wind comfort environment, ecological situation, aeration regime, SigmaFlow software package.

Acknowledgements. The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project no. 22-61-00098).

Citation: Meshkova, V.D., Dekterev, A.A., Filimonov, S.A. and Litvintsev, K. Yu. SigmaFlow as a tool for studying wind comfort in urban environment, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2022, 15(4), 490–504. DOI: 10.17516/1999-494X-0398

SigmaFlow как инструмент исследования ветрового комфорта в условиях городской среды

**В. Д. Мешкова^а, А. А. Дектерев^{а, б},
С. А. Филимонов^{а, б}, К. Ю. Литвинцев^б**

*^аСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

*^бИнститут теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
Красноярский филиал
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Интенсивный рост современных городов приводит к строительству жилых микрорайонов с плотным расположением зданий различной высотности. Подобные архитектурные решения способствуют непредсказуемому изменению аэрационного режима территории, который может вызывать ухудшение экологической обстановки города, а также формирование дискомфортных условий в зоне пребывания человека. Для изучения механизмов формирования данных условий и прогнозирования ветрового режима используется микромасштабная модель атмосферы города, реализованная в программе «SigmaFlow». В работе представлены результаты верификации численной модели с экспериментальными данными на двух тестовых задачах обтекания модельных элементов городской застройки. Полученные результаты расчетов демонстрируют достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными. Кроме этого, был выполнен анализ формирования ветровых условий в реальном жилом микрорайоне. Получены характерные структуры течения при обтекании зданий, а также выявлены места формирования дискомфортных и опасных зон для пребывания человека.

Ключевые слова: строительная аэродинамика, численное моделирование, ветровая комфортная среда, экологическая обстановка, аэрационный режим, ПО SigmaFlow.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-61-00098).

Цитирование: Мешкова, В. Д. SigmaFlow как инструмент исследования ветрового комфорта в условиях городской среды / В. Д. Мешкова, А. А. Дектерев, С. А. Филимонов, К. Ю. Литвинцев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(4). С. 490–504. DOI: 10.17516/1999-494X-0398

Введение

Современная урбанизация сопровождается ростом высотного строительства с уплотненным типом застройки, что приводит к существенному изменению локального, а иногда и городского аэрационного режима, связанного с формированием областей как с пониженными, так и с повышенными скоростями воздушного потока. Необходимо учитывать, что аэрационный режим – это динамически изменяющееся состояние городской среды, которое зависит от метеорологических условий, архитектуры городской застройки и теплообменных процессов внутри нее. Механизмы формирования данных условий влияют на экологическую обстановку в городе и реализацию комфортных или дискомфортных условий для жизнедеятельности человека. Вследствие этого исследование закономерностей взаимодействия элементов городской инфраструктуры, ландшафтов и климатических условий становится востребованным и перспективным направлением

в прикладной науке [1]. Таким образом, развитие современных городов не только становится проблемой архитекторов, дизайнеров и проектировщиков, но и является научной проблемой, требующей комплексного анализа и разработки программных инструментов для его проведения.

Ветровой (аэрационный) режим территории города является одним из наиболее важных факторов, который необходимо учитывать при строительстве. История градостроительства дает многочисленные примеры решения задачи его формирования в различных странах. Наибольший интерес вызывают попытки учета ветровых условий в качестве формирования безопасной и комфортной жилой среды в городе. Специфика природно-климатических условий и, в частности, ветрового режима до настоящего времени учитывается лишь при разработке отдельных проектов, в основном экспериментальных. На сегодняшний момент отсутствует дифференцированный подход к планировке и застройке городов или городских территорий, расположенных в разных ветровых условиях. Профессор Н. М. Томсон занимался вопросами, которые отображали взаимодействие ветра с городскими элементами в виде зданий. Подобные исследования проводили также и российские ученые А. В. Титов, В. К. Лицкевич и др. Стоит отметить, что многие существующие работы по оценке аэрационного режима территорий основаны, как правило, на анализе комплекса природно-климатических факторов, которые в основном учитывают механическое воздействие на застройку в виде ветровых нагрузок, а учет ветровых условий с точки зрения комфортности рассматривается не так подробно [2]. С другой стороны, появились относительно новые подходы к анализу ветровой нагрузки на основе методов вычислительной гидродинамики, которые позволяют подробно рассматривать как аэродинамику воздушных потоков внутри городской застройки, так и формирование условий пешеходной комфортности.

В настоящее время большая часть научных групп занимаются изучением процессов тепло-массопереноса в городской среде на основе численного моделирования. В России можно выделить работу С. Дубинского, который описал методику численного моделирования ветрового воздействия на высотные здания [3]. Математических микромасштабных моделей для моделирования обтекания элементов городской инфраструктуры микроклимата существует достаточно много, только в работе [4] их приведено более 20. Данные модели отличаются друг от друга пространственной размерностью, моделируемыми процессами и используемыми численными методиками. Кроме специализированных программ могут использоваться адаптированные универсальные вычислительные комплексы, например ANSYS [5, 6]. Однако большинство из данных исследований не рассматривает аэрационный режим применительно к городской застройке с точки зрения комфортности пребывания людей.

В настоящее время научных групп, которые занимаются изучением ветрового комфорта в городской среде на основе численного моделирования, становится все больше. Так, например, данными вопросами активно занимаются ученые в Архитектурном институте Японии [7, 8], группа европейских специалистов под руководством Дж. Франке и Б. Блокена в рамках проекта SOST [9].

В связи с растущим интересом к проблемам экологии и комфортности городской среды была выполнена адаптация программного комплекса «SigmaFlow» для возможности проведения высокопроизводительных кластерных вычислений под рассматриваемый класс задач [10].

Важный вопрос любого численного исследования – это оценка адекватности численных прогнозов. В данной статье представлены результаты тестирования программы «SigmaFlow»

на основе численных и экспериментальных работ, выполненных Архитектурным институтом Японии, несколькими частными группами и Технологическим институтом Ниигата [8, 11].

Математическая модель

Пространственная микромасштабная математическая модель численного анализа ветрового режима в городской среде основана на решении осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье – Стокса для несжимаемых течений с переменной плотностью:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla(\hat{\tau}^m + \hat{\tau}^t) + \mathbf{F}, \quad (2)$$

где p – давление; \mathbf{v} – вектор скорости; \mathbf{F} – вектор объемных сил; $\hat{\tau}^m$ – тензор вязких напряжений и $\hat{\tau}^t$ – тензор турбулентных напряжений Рейнольдса:

$$\begin{aligned} \tau_{ij}^m &= \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \\ \tau_{ij}^t &= \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k, \end{aligned} \quad (3)$$

где v_i – компоненты вектора скорости; μ , μ_t – вязкость и турбулентная вязкость жидкости; k – удельная кинетическая энергия турбулентных пульсаций.

В качестве базовой модели, позволяющей разрешать пограничный турбулентный слой, используется двухпараметрическая k - ω SST модель [12]. Для численного сопоставления поля скорости и давления использовался алгоритм SIMPLE-C. Дискретизация уравнения сохранения в расчетной области осуществляется методом контрольного объема. Математическая модель турбулентного движения воздуха реализована в программном комплексе SigmaFlow [10, 13].

Для верификации численной модели рассматривались две модельных задачи: обтекание одиночного и группы объектов, которые имеют упрощенный вид зданий и представлены в виде четырехугольной призмы с характерными размерами.

1. Верификация математической модели на примере обтекания одиночного модельного здания и их групп

Рассматривалась экспериментальная работа обтекания одиночного объекта длинной формы, имитирующего здание. Характерные размеры объекта (здания) составляют $b \times 4b \times 4b$ при $b=50$ мм (рис. 1) [8].

Представленная на рис. 1 геометрия была воспроизведена в собственном сеткопостроителе программного комплекса «SigmaFlow». Используется неструктурированная расчетная сетка, состоящая из шестигранных элементов (рис. 2).

Профиль скорости набегающего потока по высоте (U) и кинетическая энергия турбулентных пульсаций (ТКЕ) на входной границе расчетной области определялись с помощью линейной интерполяции экспериментальных данных. На боковых и верхней границах задавались условия симметрии. На выходе из расчетной области соблюдались условия постоянства статического давления. Число Рейнольдса при $z=H=4b$ составляло около $7,2 \times 10^4$. Рассматрива-

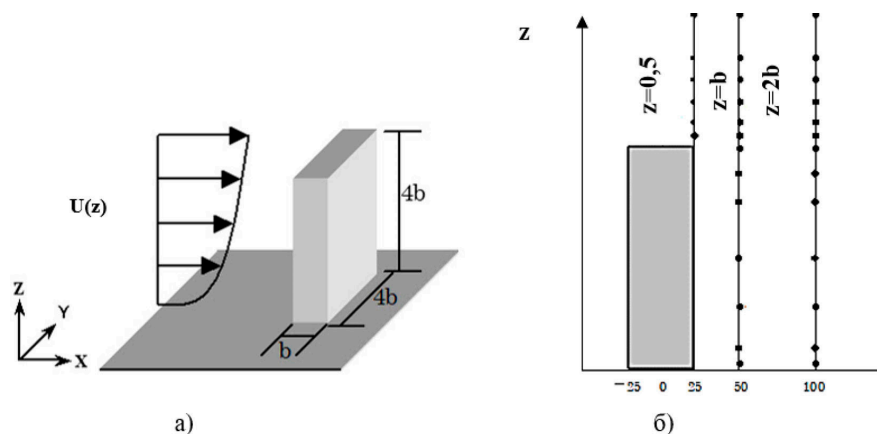


Рис. 1. Схематический вид расположения моделируемого объекта (здания) по отношению к набегающему потоку (а) и контрольные сечения (б) [8]

Fig 1. Schematic view of the location of the simulated object (building) in relation to the oncoming flow (a) and control sections (b) [8]

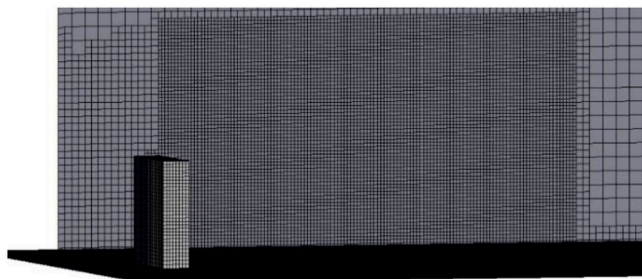


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки

Fig. 2. Fragment of the computational grid

лось два варианта расчета, отличающихся разным количеством расчетных ячеек, а именно $\sim 1,0$ млн и $\sim 2,5$ млн.

В результате набегающего потока к передней стенке здания происходит его торможение, которое приводит к появлению избыточного давления и в итоге, к формированию зоны подпора (рис. 3б). На кромке верхней стенки происходит поджатие потока, что приводит к значительному увеличению средней скорости до 8 м/с, формируется зона локального ускорения. При обтекании боковых граней поток также укоряется, но, кроме этого, он прижимается к нижней поверхности (рис. 4). За зданием образуется аэродинамическая тень, протяженность которой практически в два раза больше его высоты ($L \sim 8b$). Основная особенность данной зоны заключается в понижении скорости потока до минимальных значений, что приводит к снижению энергии турбулентных пульсаций потока, особенно в центре циркуляционной зоны (рис. 3а, рис. 5).

На рис. 5 представлены результаты сравнительного анализа численного моделирования с использованием «SigmaFlow» с данными эксперимента по продольной компоненте скорости и ТКЕ на разных высотах. Из анализа видно, что наблюдается хорошее совпадение по скоро-

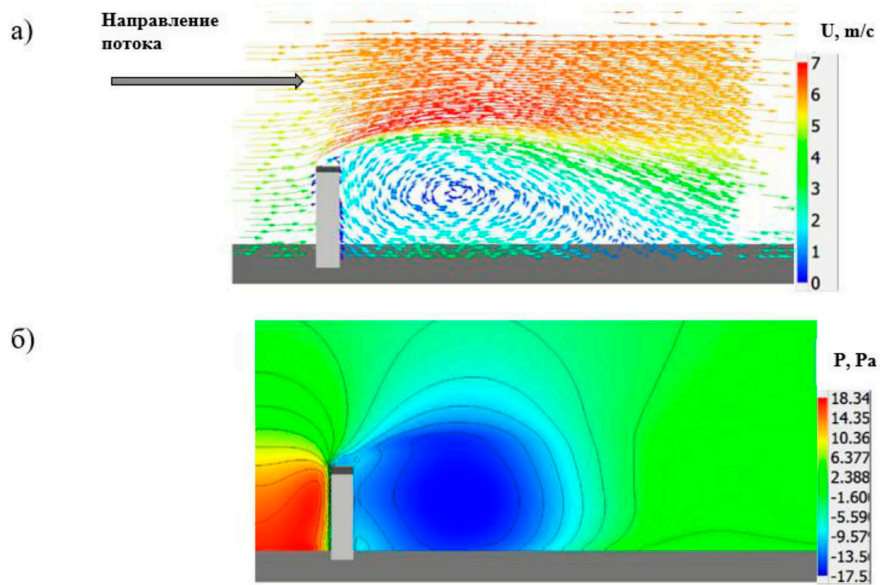


Рис. 3. Модуль скорости (а) и поле давления (б) в поперечном сечении

Fig. 3. Velocity modulus (a) and pressure field (b) in cross section

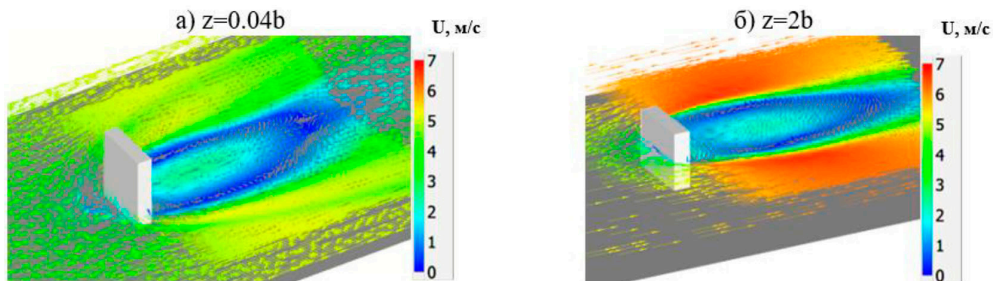


Рис. 4. Поле скорости на разных высотах в продольном сечении, м/с

Fig. 4. Velocity field at different heights in longitudinal section, m/s

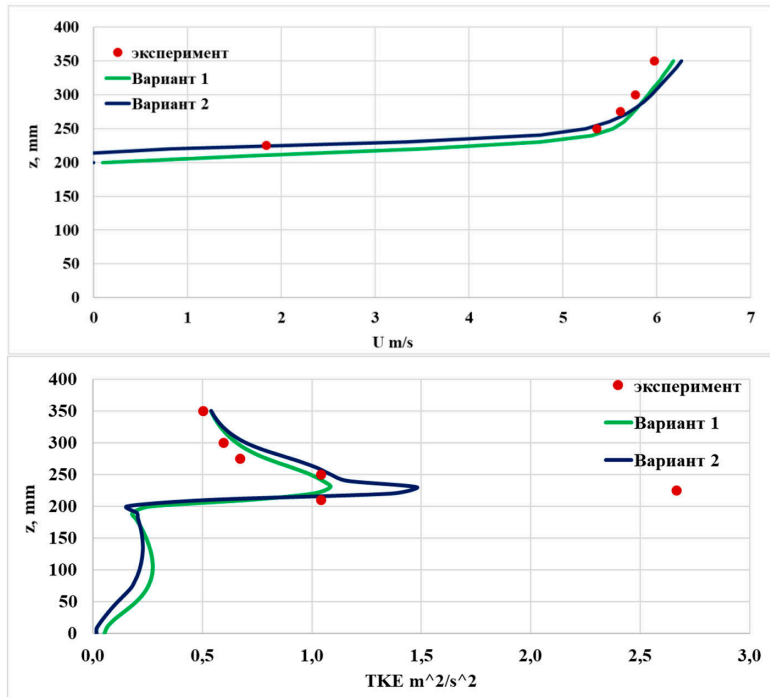
сти потока вне зависимости от сеточной детализации. При анализе результатов ТКЕ видно, что с ростом детализации сетки отклонение от эксперимента уменьшается. В целом вариант с большей детализацией ($\sim 2,5$ млн ячеек) демонстрирует хорошее соответствие эксперименту.

В качестве второй тестовой задачи использовался эксперимент с имитацией городского района, в центре которого находится высотное здание $0,25$ м, окруженное низкими зданиями с уплотненным расположением по отношению друг к другу высотой $0,025$ м (рис. 6) [11].

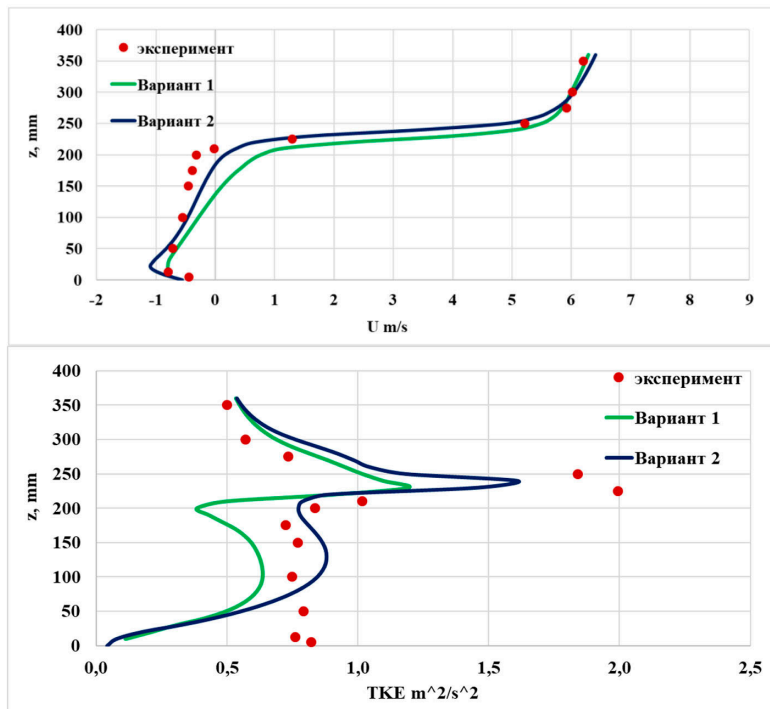
Для проведения численного моделирования были построены несколько неструктурированных гексагональных сеток с различной детализацией: вариант 1 $\sim 1,4$ млн вариант 2 $\sim 4,5$ млн вариант 3 $\sim 5,3$ млн. Для всех вариантов в области зданий использовалась наиболее детальная сетка.

Математическое моделирование позволяет явно увидеть структуру вихревого потока, который формируется при обтекании зданий (рис. 7). Анализируя картину течения, видим, что

$z=0,5b$



$z=b$



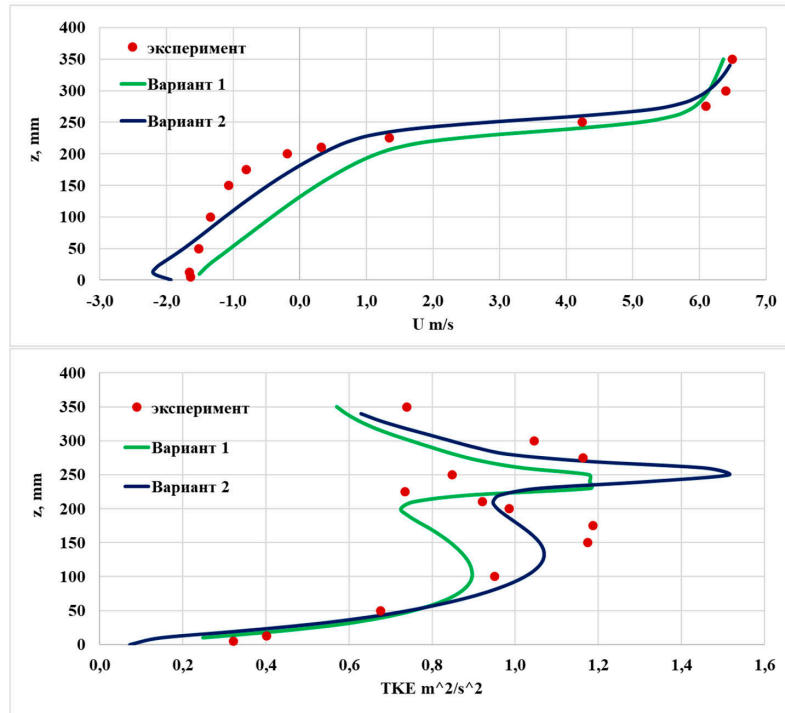
$z=2b$ 

Рис. 5. Распределение компоненты скорости и турбулентных кинетических пульсаций в продольном сечении на разной высоте

Fig. 5. Distribution of the velocity component and turbulent kinetic fluctuations in the longitudinal section at different heights

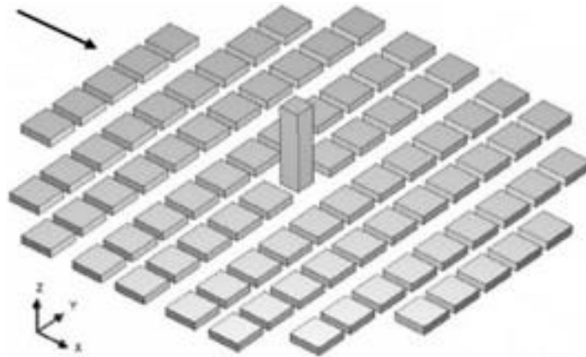


Рис. 6. Схема макета района, исследуемого в аэродинамической трубе [11]

Fig. 6. Scheme of the simulated area in the wind tunnel [11]

за высотным зданием образуется вихревая зона. Максимальная скорость течения возникает в области срыва вихрей с острых боковых граней здания и составляет около 5 м/с. Плотное расположение малоэтажных домов приводит к образованию зон рециркуляции с низкими скоростями ветра, где происходит задержание ветрового потока с дальнейшим затруднением выноса его за территорию объектов. Максимальное избыточное давление наблюдается в фронтальной

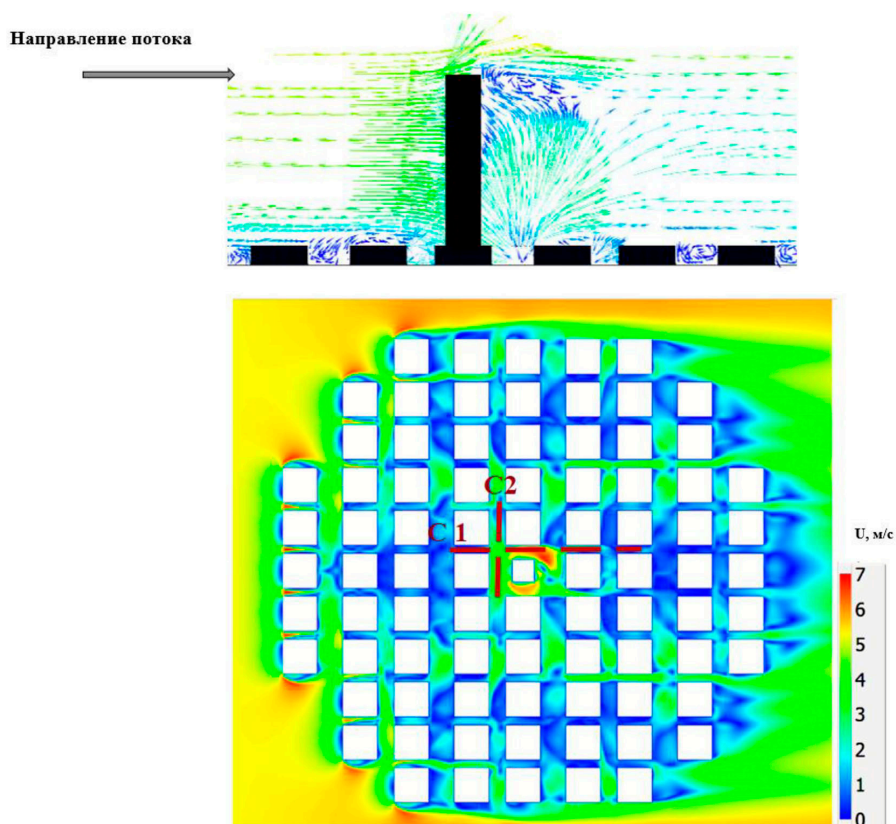


Рис. 7. Поле скорости в поперечном и продольном сечении на высоте 2 м

Fig. 7. Velocity field in transverse and longitudinal sections at a height of 2 m

плоскости многоэтажного здания, а над верхней поверхностью и за обтекаемым телом относительное давление отрицательно.

Стоит отметить, что длина здания является определяющей характеристикой для формирования аэродинамической тени. В случае, когда здание широкое, создается дополнительное сопротивление обратному потоку воздуха к центру циркуляции воздуха, при этом разрежение над зданием увеличивается, приводит к уменьшению высоты аэродинамической тени (рис. 3а, 7).

На рис. 8 представлено сравнение расчета с данными эксперимента по скорости потока вдоль двух линий, расположенных на высоте 2 м. Сопоставление показывает, что результаты расчетов, полученные на сетке с большей детализацией, демонстрируют более хорошую корреляцию с экспериментальными данными. Стоит отметить, что при любой детализации сетки результаты расчетов, полученные в программе «SigmaFlow», демонстрируют лучшее совпадение с экспериментом по сравнению с собственными расчетами авторов тестовой задачи (рис. 8).

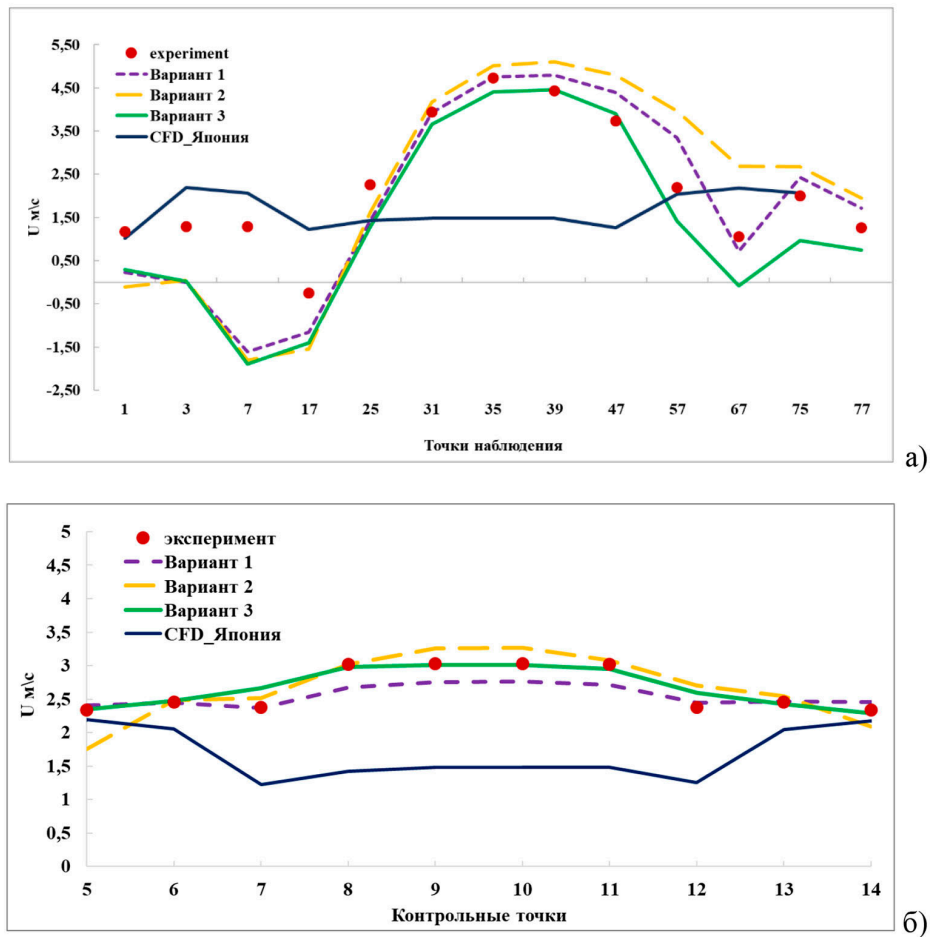


Рис. 8. Результаты сопоставления численного моделирования с экспериментальными данными в сечениях C1 (а), C2 (б)

Fig. 8. Comparison results of numerical simulation with experimental data in sections C 1 (a), C 2 (b)

Расчетное исследование скоростей ветра и пешеходной комфортности в зонах жилой застройки

В ходе проведения дальнейших исследований была выполнена апробация предложенных численных подходов на реальном микрорайоне.

Рассматривалось обтекание ветровыми потоками микрорайона Оганер г. Норильска. Конструктивно район состоит в основном из девятиэтажных зданий (30 м), имеет закрытый контур строения и линейное расположение зданий. На территории микрорайона располагается средняя школа, в дворовой части имеется детский сад. Высота муниципальных сооружений составляет 12 м.

Согласно данным метеорологической станции «Норильск», в зимний период времени преобладающим направлением ветра является юго-восточное. Скорость ветра в расчете задавалась равной 10 м/с на высоте 10 м, что соответствует слабой метели, характерной для данного региона.

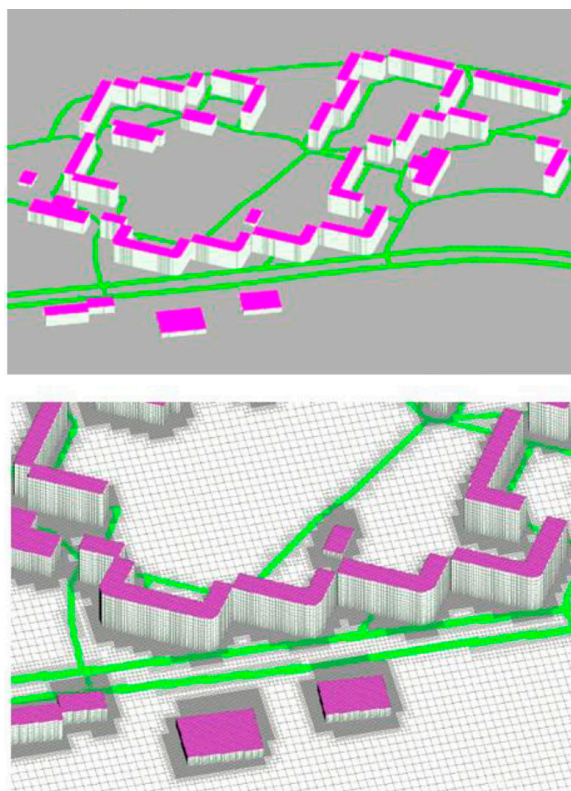


Рис. 9. Геометрия исследуемого района и фрагмент расчетной сетки

Fig. 9. Geometry of the study area and a fragment of the computational grid

Расчетная область представляет параллелепипед, продольная ось которого проходит вдоль основного направления ветра (рис. 9).

Результаты численного исследования представлены в виде векторного поля скорости в горизонтальном сечении на высоте 2 м, в зоне пребывания человека (рис. 10).

Структурная особенность микрорайона заключается в его практически замкнутом контуре по отношению к набегающему потоку. Расположение зданий в линию рассматривается как гаситель входной скорости ветра. Несмотря на относительно сильный внешний ветер (~ 8.5 м/с), в дворовой части в прилегающей к домам зоне наблюдаются области пониженных скоростей, от 0–2 м/с. Данный эффект вызван тем, что в результате обтекания здания за ним формируется аэродинамическая тень. Данные условия благоприятствуют снижению негативного механического воздействия на людей со стороны ветровой нагрузки, но приводят к возможности формирования экологически небезопасных зон, если непосредственно рядом с ними будут располагаться источники загрязнения (например, выбросы от автомобильного транспорта), так как в зонах застоя практически отсутствует процесс рассеивания загрязняющих веществ.

Стоит обратить внимание, что входы в здания и сооружения располагаются в местах, где фиксируются пониженные скорости ветра.

При рассмотрении зданий, когда ветровой поток обтекает их с обеих сторон, вдоль каждой их торцевой грани наблюдается локальное усиление ветра до 11 м/с. Данные скорости явля-

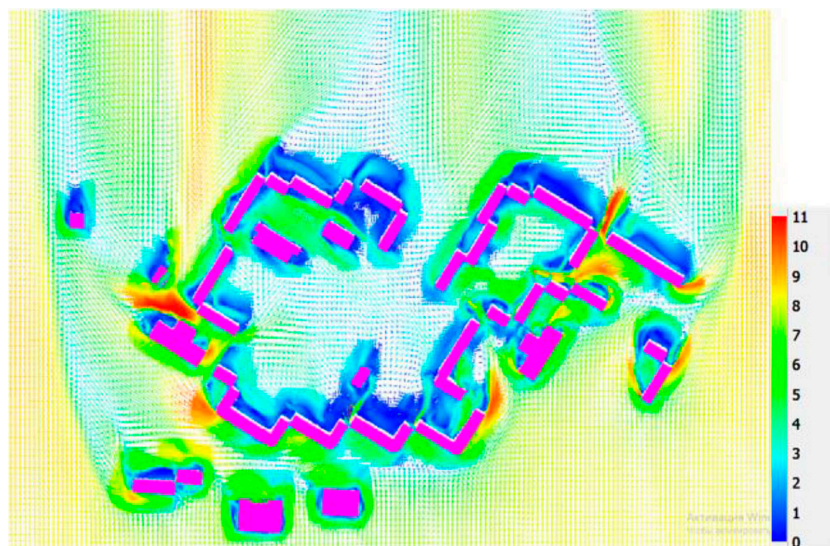


Рис. 10. Векторное поле скорости в горизонтальном сечении на высоте 2 м, м/с

Fig. 10. Velocity vector field in a horizontal section at a height of 2 m, m/s

ются не только дискомфортными для человека, особенно при отрицательных температурах, но и весьма опасными из-за возможности получения травмы в ходе механического воздействия ветра. Также в данных зонах может происходить локальное образование пылевых и снежных метелей.

В условиях плотного расположения наблюдаемых объектов особую роль играет именно взаимодействие вихрей, срывающихся с кромок зданий, которые формируют зону со значительным ускорением скорости потока (рис. 11). Места локальных ускорений ветра носят негативный характер не только для жизнедеятельности людей, но и для зданий, так как в них будут наблюдаться увеличение теплотерь, усиление шумовых и вибрационных воздействий и появление дополнительных нагрузок на конструктивные элементы здания.

При рассмотрении центральной части дворовой территории микрорайона необходимо отметить, что в ней наблюдаются достаточно высокие скорости, несмотря на практически сплош-

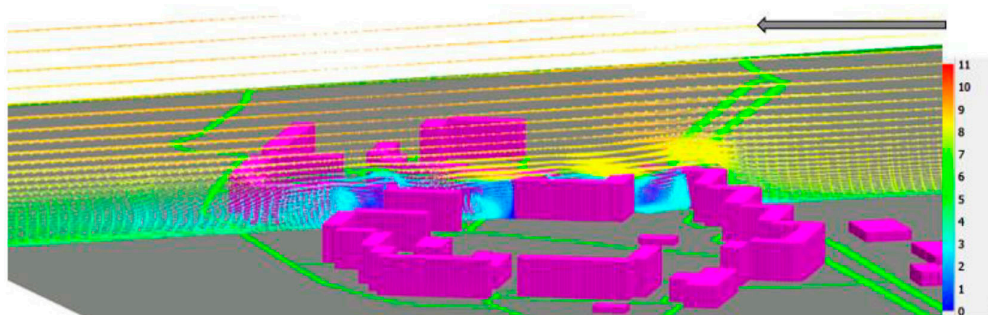


Рис. 11. Векторное поле скорости в поперечном сечении, м/с

Fig. 11. Vector velocity field in various cross sections, m/s

ную линию высотных зданий. Это связано, в первую очередь, с формированием боковыми зданиями (как справа, так и слева) «ветровых» ловушек, доставляющих через широкие боковые разрывы воздушный поток на дворовую территорию, который, взаимодействуя с воздушным потоком, возникающим при обтекании зданий сверху, формирует крупномасштабные трехмерные вихри (рис. 10, 11). При этом локальная скорость ветра внутри дворовой территории может иметь направление, противоположное внешнему ветру.

На основании полученных результатов численного моделирования выделены различные скоростные зоны в микрорайоне согласно критериям ветрового комфорта по стандарту NEN 8100. В данном стандарте порог дискомфортной скорости ветра составляет 5 м/с [14].

Области класса А, где скорости ветра не превышают 2,5 м/с, являются благоприятными ветровыми условиями для человека. Рекомендовано расположение зон отдыха, детских площадок, а также общественных террас. Стоит отметить, что существующая застройка микрорайона по отношению к господствующему ветру выполнена так, что для большинства входов-выходов из зданий создаются достаточно комфортные условия. В центральной части микрорайона наблюдается повышение скоростного режима до 5 м/с (класс В), что с учетом отрицательных температур приводит к формированию дискомфортных условий. При расположении какой-либо инфраструктуры в данных областях необходимо предусмотреть мероприятия по снижению ветра, в особенности при расположении зон отдыха для детей (рис. 12). Прилегающая зона микрорайона характеризуется скоростным режимом класса С для заданной скорости ветрового потока. В локальных зонах наблюдается увеличение скорости до класса D. В этих зонах формируются опасные для жизни условия, в которых необходимо выполнять ветрозащитные мероприятия.

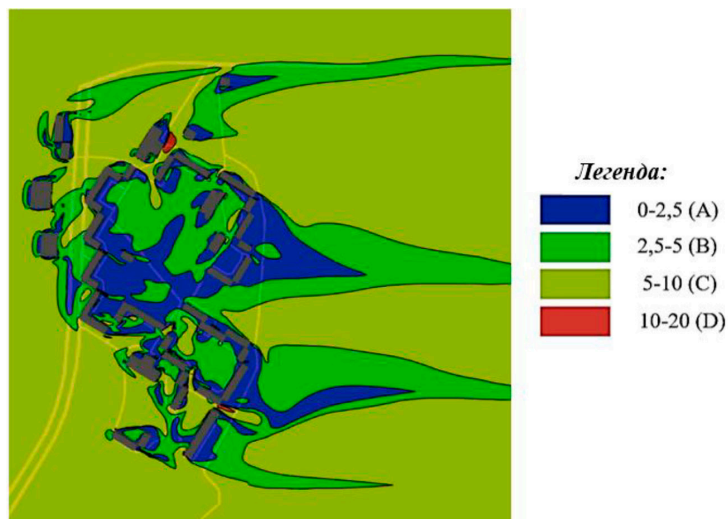


Рис. 12. Карта-схема расположения ветровых зон комфорта

Fig. 12. Map-scheme of the location of wind comfort zones

Выводы

На основании проведенных верификационных расчетов можно сделать вывод, что программный комплекс «SigmaFlow» позволяет корректно прогнозировать скорость ветра при моделировании как отдельно стоящих зданий, так и целых микрорайонов. Представленная математическая модель может быть использована для оценки аэрационного режима городской среды с точки зрения комфортного пребывания человека. Для этого был предложен способ зонирования городской среды по условию комфортности, основанный на стандарте NEN 8100. В качестве примера подобного зонирования был использован микрорайон Оганер города Норильска, для которого характерны относительно высокие ветровые нагрузки. Результаты проведенного зонирования могут быть использованы при реформировании существующего дворового пространства, связанного с изменением мест отдыха, детских площадок, автомобильных парковок и т.д., а также при организации ветрозащитных мероприятий в зонах класса D.

Стоит отметить, что приведенные в статье расчеты выполнены в изотермической постановке. Дальнейшее развитие методов зонирования с привлечением численного моделирования предполагает кроме скорости ветра учитывать и процессы теплообмена.

Список литературы / References

- [1] Маркина Е.П. Архитектурный и градостроительный ракурсы проектирования современных городов. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2017, 2(56), 145–147 [Markina E. P. Architectural and urban planning prospects for the design of modern cities, *International Scientific Research Journal*, 2017, 2(56), 145–147 (in Russian)]
- [2] Лисициан М.В., Пашковский В.Л. и др. *Архитектурное проектирование жилых зданий*, под ред. М.В. Лисициана. М.: Стройиздат. 2006, 488 с [Pronina E. S. *Architectural design of residential buildings*, ed. M. V. Lisitsian. Moscow: Stroyizdat. 2006, 488 p. (in Russian)]
- [3] Дубинский С.И. *Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы*, дис. ... канд. техн. наук, Санкт-Петербург, 2010, 198 с. [Dubinsky S.I. *Numerical modeling of wind effects on high-rise buildings and complexes*, dis. ... cand. techn. sciences, St. Petersburg, 2010, 198 p. (in Russian)]
- [4] Toarlar Y., Blocken B., Vos P., van Heijst G.J.F., Janssen W.D., van Hooff T., Montazeri H., Timmermans H.J.P. *CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam*, *Building & Environment*, 2015, 83, 79–90
- [5] H. K. Versteeg, W. Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method*. Pearson, 517 p.
- [6] Okaze, T., Kikumoto, H., Ono, H., Imano, M., Ikegaya, N., Hasama, T., Nakao, K. Kishida, T., Tabata, Y., Yoshie, R., Tominaga, Y.. *Large-Eddy Simulation of Flow around Buildings: Validation and Sensitivity Analysis*. 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE 9), Auckland, New Zealand, 2017, December 3–7
- [7] Architectural Institute of Japan, AIJ benchmarks for validation of CFD simulations applied to pedestrian wind environment around buildings. Architectural Institute of Japan, 2016
- [8] Miyazaki, T., Tominaga, Y.. *Wind tunnel experiment on flow field around a building model with a scale ratio of 4:4:1 placed within the surface boundary layer*. Proceedings of Annual Meeting of Hokuriku Chapter, Architectural Institute of Japan, 2003, 201–204. (in Japanese)

[9] Franke J, Hellsten Antti and at al. *The COST 732 Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary*, 2011, 419–427

[10] Дектерев А. А. Современные возможности CFD кода SIGMAFLOW для решения физических задач, *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. Сборник научных статей. Киев: НПБК “Триакон”, 2010, 2(4), 117–122 [Dekterev A. A. Modern possibilities of CFD code SIGMAFLOW for thermophysical solutions, *Modern science: research, ideas, results, technologies*. Collection of scientific articles. Kyiv: NPVK “Triakon”, 2010, 2(4), 117–122 (in Russian)]

[11] AIJ, 2015. AIJ Recommendations for Loads on Buildings (2015). (English Download sales only) http://www.aij.or.jp/eng/publish/index_ddonly.htm

[12] Menter F R 1993 AIAA Paper 93(2906) 21

[13] Патанкар С. *Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости*. М.: Энергоатомиздат, 1984 [Patankar S. *Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics*. Moscow: Energoatomizdat, 1984 (in Russian)]

[14] Criteria for wind comfort according to the Dutch wind nuisance standard NEN 8100 2006 (NEN, 2006. Wind comfort and wind danger in the built environment. NEN 8100. Dutch Standard)