

Исследование влияния длины улиц на течение воздуха в них

^{1,2} М.В. Волик <volikmv@mail.ru>

¹ Финансовый университет при Правительстве РФ,
362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Молодежная, 7

² Южный математический институт ВНИЦ РАН и РСО-Алания,
362027, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркуса, д. 22

Аннотация. В работе проводится сравнение результатов математического моделирования аэродинамики типичных городских застроек с разной длиной улиц. Расчеты проводились с помощью свободно распространяемого пакета OpenFoam и удаленного доступа к консоли на управляющем узле вычислительного кластера BL2x220 Cluster Console <https://unihub.ru/resources/bl2x220cc> Web-лаборатории Unihub (www.unihub.ru) по программе «Университетский кластер» (www.unicluster.ru). Рассмотрены одиночная улица с домами одинаковой высоты по ее сторонам, одиночная улица с домами разной высоты по ее сторонам и две параллельные улицы, расположенные на склоне холма. Сравнение результатов расчетов в двумерном и трехмерном приближении показало, что длина улиц оказывает значительное влияние на качественную и количественную картины течения внутри улиц и над застройкой.

Ключевые слова: математическое моделирование; аэродинамика; городская застройка; OpenFoam.

1. Введение

В настоящее время математическое моделирование аэродинамики улиц позволяет с минимальными затратами выявлять и решать задачи экологического характера. Перспективным является исследование распространения загрязняющих веществ, выбрасываемых автомобилями, число которых катастрофически увеличивается на улицах городов, а также стационарных или аварийных выбросов производственными предприятиями. Величина концентрации загрязняющих веществ зависит не только от плотности движения автотранспорта, но и от характеристик воздушного потока в городской застройке. Прежде чем анализировать распределение загрязняющих веществ, необходимо получить картину течения воздуха внутри улиц и над ними, которая позволит определить наиболее опасные области, в которых скапливаются загрязняющие вещества.

Снижение затрат по решению поставленной задачи позволяет использование и развитие свободного программного обеспечения: открытых пакетов, подобных OpenFoam (Open Field Operation and Manipulation), Dolphyn, Salome, Engrid, Paraview и других [1].

В данной работе математическое моделирование течения воздуха в городской застройке проводилось с помощью свободно распространяемого пакета OpenFoam, который работает под различными версиями открытой операционной системы Linux (OpenSuse, Centos, Ubuntu, Fedora, Debian и другие), и удаленного доступа к суперкомпьютеру Web-лаборатории UniHUB (www.unihub.ru) по программе «Университетский кластер» (www.unicluster.ru).

2. Постановка задачи

Структура OpenFoam является полностью модульной, каждый этап численного решения базовых уравнений выносится в отдельный модуль: дискретизация расчетной области (создание сетки), дискретизация уравнений по времени и пространству, методы решения систем линейных алгебраических уравнений, граничные условия (в том числе пристеночные функции), модели турбулентности (Reynolds-Averaged Stresses, Large Eddy Simulation), контроль качества сетки [1].

В качестве постпроцессора для визуализации результатов расчетов предназначен пакет ParaView, интегрированный в OpenFoam и UniHUB. ParaView позволяет построить линии тока, графики по одной или нескольким величинам, рассчитать средние значения по объему или поверхности, рассчитать перепад давления, экспортировать данные в файлы и т.д.

Решаемая в OpenFoam задача обязательно содержит: начальные и граничные условия; расчетную сетку, а также физические свойства и параметры интегрирования уравнений [1]. Для проведения вычислительных экспериментов использовался стандартный решатель pimpleFoam для турбулентного течения жидкости, в котором применяется алгоритм связи скорости и давления Pimple. Предполагалось, что движущийся воздух является несжимаемой жидкостью. Система уравнений включала уравнение неразрывности

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

и уравнение изменения импульса

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \vec{U} - \nabla \cdot ((\nu + \nu_t) \nabla \vec{U}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P, \text{ где}$$

\vec{U} – вектор скорости (м/с),

t – время (с),

P – давление (м²/с²),

ρ – плотность воздуха (1.2 кг/м³),

ν – ламинарная вязкость ($\text{м}^2/\text{с}$),

ν_t – турбулентная вязкость ($\text{м}^2/\text{с}$).

Турбулентность моделировалась с использованием стандартной $K-\varepsilon$ модели, для которой решались уравнения для кинетической энергии турбулентности

$$\frac{\partial}{\partial t} K + \frac{\partial}{\partial x_i} (K U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + P_k - \varepsilon$$

и скорости ее диссипации

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{K} \quad \text{где}$$

K – энергия турбулентности ($\text{м}^2/\text{с}^2$),

ε – скорость диссипации энергии турбулентности ($\text{м}^2/\text{с}^3$),

P_k – скорость порождения энергии турбулентности.

Турбулентная вязкость определяется как: $\nu_t = C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon}$

Начальные значения для K и ε выбираются на основе следующих формул:

$$K = \frac{1}{2} (U_x'^2 + U_y'^2 + U_z'^2) \quad \varepsilon = \frac{C^{0.75} K^{3/2}}{l}$$

где $U_x'^2, U_y'^2, U_z'^2$ – усредненные квадраты пульсационных компонент скорости в направлениях x , y и z соответственно. Предполагается, что начальная турбулентность изотропна, т. е. $U_x' = U_y' = U_z'$ и равна 5% от скорости воздуха на входе, а длина l равна расстоянию от нижней границы расчетной области до верхней. Тогда:

$$K = 0.375 (\text{м}^2/\text{с}^2) \quad \varepsilon = 0.001 (\text{м}^2/\text{с}^3). \quad [2]$$

В расчетах использованы следующие безразмерные константы [2] $C_\mu = 0.09, \kappa = 0.41, E = 9.8, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{3\varepsilon} = 0.09, C_{2\varepsilon} = 1.92$.

Использовались следующие граничные условия:

- для скорости: на входе фиксированное значение (10 м/с); на верхней и выходной границах – нулевой градиент ($\frac{\partial U}{\partial n} = 0$); на стенках домов и дне уличного каньона – фиксированное значение, равное нулю;

- для избыточного давления: на входе, верхней и нижней границах принимался нулевой градиент ($\frac{\partial P}{\partial n} = 0$), а на выходе — фиксированное значение, равное нулю;
- для турбулентной вязкости: на входе, выходе и верхней границе – значения получены по $K-\varepsilon$ модели, на нижней границе (стенках) – использовалась пристеночная функция `nutkWallFunction` [2].
- для энергии турбулентности: на входе – фиксированное значение $K=0.375$, на выходе и верхней границе – нулевой градиент ($\frac{\partial K}{\partial n} = 0$), на нижней границе – пристеночная функция `kqRWallFunction` [2].
- для скорости диссипации энергии турбулентности: на входе – фиксированное значение $\varepsilon = 0.001$, на выходе и верхней границе – нулевой градиент ($\frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0$), на нижней границе – пристеночная функция `epsilonWallFunction` [2].

Серия вычислительных экспериментов проводилась для интервала времени от 0 до 100 с. (с шагом 0.001 с.). Использовалась равномерная расчетная сетка в прямоугольной области с шагом по пространству 1 м. В качестве масштаба скорости U_1 выбрано значение скорости воздуха в центре улиц на уровне крыш. Входная граница располагается слева, т.е. моделируется течение воздуха поперек улиц. Расстояние от входной границы до наветренной стороны застройки принималось равным десяти высотам, от подветренной стороны застройки до выходной границы – двадцати высотам, от нижней границы расчетной области до верхней границы – шести высотам. Исследуются три варианта конфигурации городской застройки, каждый из которых рассмотрим подробнее.

3. Моделирование течения воздуха в одиночной улице с домами одинаковой высоты по ее сторонам и сравнение с экспериментальными данными

Типичная одиночная улица с домами одинаковой высоты по ее сторонам представляет особый интерес, т.к. в разной литературе приводятся результаты экспериментов в аэродинамической трубе именно для такой конфигурации.

В качестве масштаба длины h выбрана высота домов, равная 15 м. В экспериментах [3, 4] и расчетах ширина улицы принималась равной одной высоте домов. Расчет проводился в двумерном приближении, когда длина улицы составляла 1 м, и трехмерном приближении при длине улицы, равном 20 м.

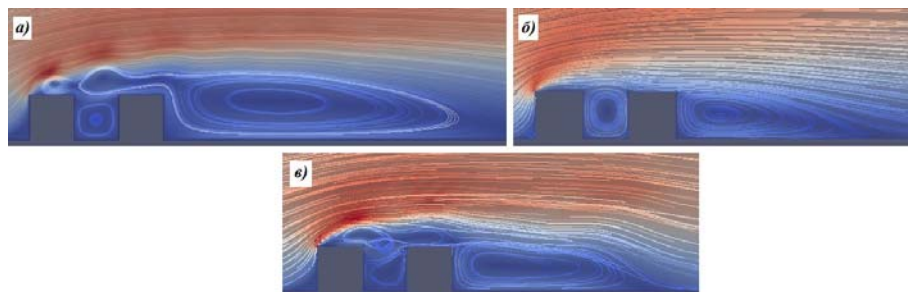


Рис. 1. Линии тока в улице с домами одинаковой высоты по ее сторонам (а – длина улицы 1м, б – длина улицы 20м, в – длина улицы 60м)

Результаты расчетов показали, что в случае двумерного варианта (рис. 1а) один вихрь образуется внутри улицы и в следе за застройкой и многовихревая структура – над всей застройкой. Внутри улицы поток воздуха перемещается против часовой стрелки, а над застройкой и в следе – по часовой стрелке. В случае трехмерного варианта (рис. 1б) получены качественно и количественно другие результаты расчетов: вихри образуются внутри улицы, в следе за застройкой и над домом на подветренной стороне. Во всех этих вихрях воздух перемещается по часовой стрелке. Кроме того, размер вихря в следе за застройкой в трехмерном случае составляет 65м, а в двумерном – 130м.

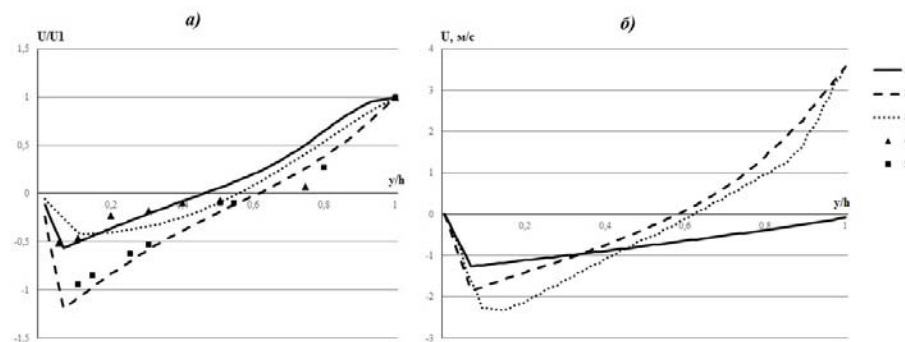


Рис.2. Распределение горизонтальной составляющей скорости воздуха по высоте в центре улиц (а) с домами одинаковой высота и в следе за застройкой (б). Кривые 1 – длина улицы 1м, кривые 2 – длина улицы 20м, кривые 3 – длина улицы 60 и/или 120м, значки 4 и 5 – экспериментальные данные [3] и [4] соответственно.

На рис.2 представлено распределение горизонтальной скорости воздуха по высоте в центре улиц и в следе за застройкой на расстоянии, равном 0.5 высоты домов. Видно, что внутри улицы центр вихря в двумерном случае

располагается ниже, чем в трехмерном, а скорость возвратного течения значительно ниже, чем при трехмерных расчетах. В следе за застройкой в двумерном случае горизонтальный размер вихря в два раза больше, чем в трехмерном, поэтому скорость потока в этом случае ниже, особенно в верхней части вихря.

Для сравнения на рис. 2а представлены экспериментальные данные. Показано, что результаты двумерных расчетов в нижней половине улицы удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными [3]. В связи с тем, что исследование распространения загрязняющих веществ чаще всего проводится на уровне пешеходов, т.е. на высоте 2м над проезжей частью. Полученное совпадение расчетных данных с экспериментальными подтверждает возможность использования двумерных расчетов для дальнейших исследований. Кроме того, на графике показано удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными [4] результатов трехмерных расчетов для улицы длиной 20м.

Результаты расчетов для вариантов, когда расстояние вдоль улиц составляет пять и десять высот домов, полностью совпадают между собой. Картина течения при этом (рис. 1в) качественно похожа на ту, которая получена при двумерном варианте: вихри образуются не только внутри улиц и в следе, но и над всей застройкой. Количественно же результаты несколько отличаются от двумерного варианта: горизонтальный размер вихря в следе за застройкой составляет порядка 53м, центр вихря внутри улицы располагается немного выше, а скорость возвратного течения воздуха в нем ниже (кривая 3 на рис. 2а). При длине улицы 60м и 120м изменение скорости по высоте вновь становится близким к двумерному случаю.

Таким образом, можно сделать вывод, что при проведении расчетов изменение длины улиц оказывает значительное влияние на качественные и количественные результаты для одиночной улицы с домами одинаковой высоты по ее сторонам. Это, возможно, объясняет отличия в результатах экспериментов в аэродинамических трубах.

4. Моделирование течения воздуха в одиночной улице с домами разной высоты по ее сторонам

В этом случае высота домов на наветренной стороне улицы составляла 0.5 от высоты домов на подветренной стороне, ширина улицы – одну высоту домов на подветренной стороне.

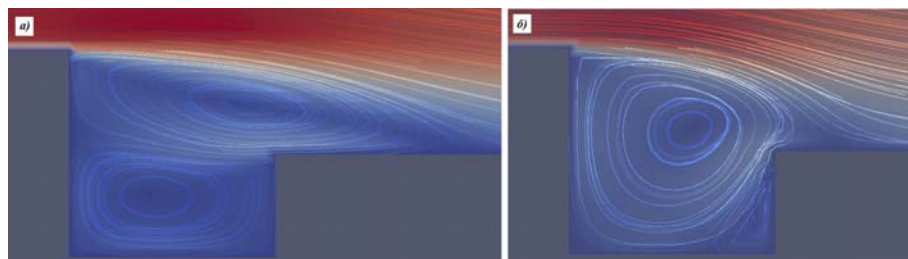


Рис. 3. Линии тока в улице с домами разной высоты по ее сторонам (а – длина улицы 1м, б – длина улицы 20м)

Результаты расчетов в двумерном приближении (рис. 3а) показали образование двухвихревой структуры. В нижнем вихре, находящимся внутри улицы, воздух вращается против часовой стрелки, а в верхнем – по часовой стрелке и затекает на крышу дома на наветренной стороне на расстояние около 20м. Скорость воздуха в нижнем вихре ниже, чем в верхнем (рис. 4).

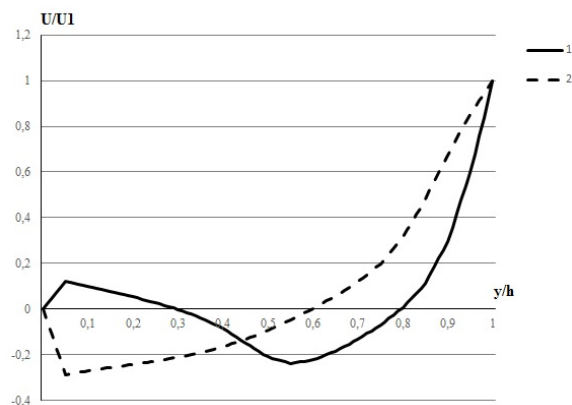


Рис.4. Распределение горизонтальной составляющей скорости воздуха по высоте в центре улицы с домами разной высоты по ее сторонам. Кривые 1 – длина улицы 1м, кривые 2 – длина улицы 20м.

С увеличением длины улицы до 20м картина течения воздуха существенно изменяется (рис. 3б). Внутри улицы, помимо основного вихря, возникает вторичный вихрь размером 4м×7м вблизи дома на наветренной стороне улицы. В основном вихре воздух перемещается по часовой стрелке, во вторичном – против часовой стрелки. Скорость воздуха в основном вихре в трехмерном случае выше, чем в двумерном.

Таким образом, как и в предыдущем варианте расчетов, изменение длины одиночной улицы с разной высотой домов оказывает значительное влияние на результаты.

5. Моделирование течения воздуха в двух параллельных улицах, расположенных на склоне холма

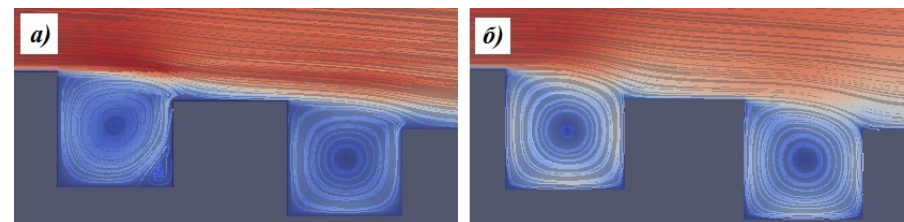


Рис. 5. Линии тока в улицах на склоне холма (а – длина улиц 1м, б – длина улиц 20м)

Разные результаты расчетов получены также при моделировании аэродинамики двух параллельных улиц, расположенных на склоне холма. Высота домов на наветренной стороне улиц в этом случае составляла 0.75 от высоты домов на подветренной стороне.

Если ширина улиц принималась равной высоте домов на подветренной стороне, картина течения в первой по потоку улице заметно отличается. В случае двумерных расчетов (рис. 5а) внутри улицы, помимо основного вихря, образуется вторичный вихрь размером 6м×8м вблизи проезжей части на наветренной стороне улицы, а в случае трехмерных расчетов (рис. 5б) вторичного вихря нет и скорость возвратного течения в основном вихре значительно выше, чем в двумерных расчетах (рис. 6а). В нижней по потоку улице в обоих вариантах образуется один вихрь, а скорость возвратного течения также больше в случае трехмерных расчетов (рис. 6б).

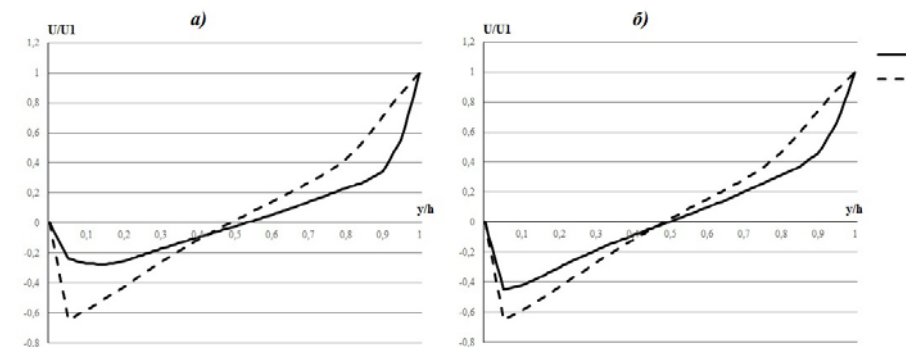


Рис.6. Распределение горизонтальной составляющей скорости воздуха по высоте в центре улиц, расположенных на склоне холма: а) улица выше по течению воздуха, б) – ниже по течению. Кривые 1 – длина улиц 1м, кривые 2 – длина улиц 20м.

Если ширина улиц, расположенных на склоне холма, принималась равной 0.5 от высоты домов на подветренной стороне, то в двумерных расчетах внутри верхней по потоку улицы образуются два вихря, расположенные друг под

другом (рис. 7а). Воздух в нижнем вихре перемещается против часовой стрелки, а в верхнем, более плоском, перемещается по часовой стрелке. Верхний вихрь заходит на крышу домов на наветренной стороне на 15м. В нижней по потоку улице образуется три вихря, расположенных друг под другом. Воздух в верхнем и нижнем вихрях перемещаются по часовой стрелке, а в вихре, расположенном между ними – против часовой стрелки. Верхний вихрь заходит на крышу дома на наветренной стороне на расстояние 12.5м.

Если длина улиц составляет 20м (рис. 7б), то в улице, расположенной выше по течению образуется также два вихря. Однако, верхний вихрь имеет значительно большие вертикальные размеры и заходит на крышу дома на наветренной стороне на расстояние около 12.5м. В нижней по потоку улице образуется только один вихрь, воздух в котором перемещается по часовой стрелке и затекает на крышу дома на наветренной стороне на 5м.

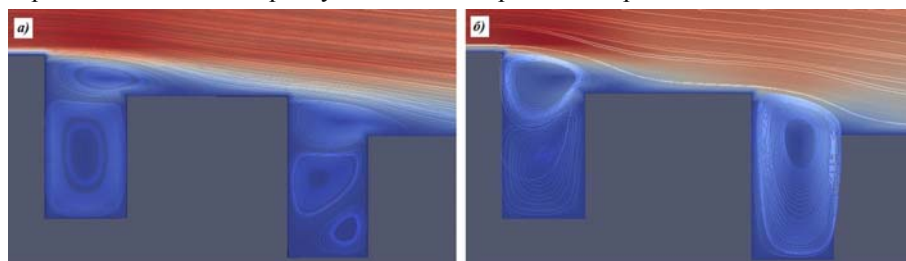


Рис. 7. Линии тока в узких улицах, расположенных на склоне холма (а – длина улиц 1м, б – длина улиц 20м)

Горизонтальная скорость потоков воздуха в центре улицы, расположенной выше по течению (рис. 8а), в случае двумерных и трехмерных расчетов почти совпадает. А в улице, расположенной ниже по течению, в верхнем вихре в случае двумерных расчетов скорость воздуха больше (рис. 8б).

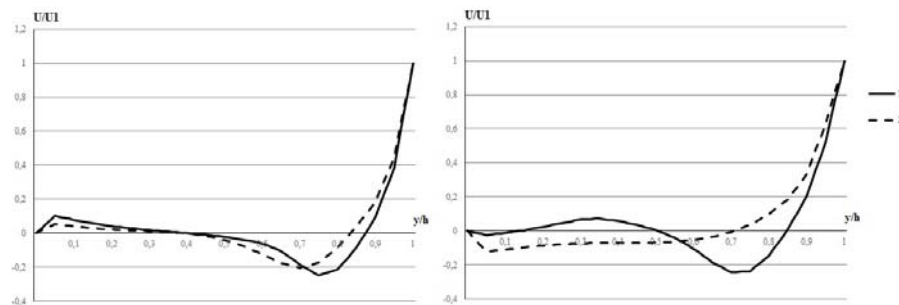


Рис.8. Распределение горизонтальной составляющей скорости воздуха по высоте в центре узких улиц, расположенных на склоне холма: а) улица выше по течению воздуха, б) – ниже по течению. Кривые 1 – длина улиц 1м, кривые 2 – длина улиц 20м.

5. Выводы

В работе показано качественное и количественное отличие вихревых структур, полученных в двумерных и трехмерных расчетах движения воздуха в одиночной улице с домами одинаковой высоты по ее сторонам, в одиночной улице с разновысокими домами и в двух параллельных улицах, расположенных на склоне холма. Причиной этого, скорее всего, является возникновение слабого течения воздуха вдоль улицы. Полученные результаты позволяют объяснить существенные отличия в экспериментальных данных различных авторов.

Список литературы

- [1]. Крапошин М.В., Самоваров О.И., Стрижак С.В. Пакет OpenFoam: численное моделирование задач МСС // Материалы школы-семинара «Основы использования OpenFoam, Salome, ParaView», https://unihub.ru/tools/unicfdcl/svn/trunk/Version2/Pdf/day1_2_4-OpenFOAM-Base.pdf.
- [2]. Каменецкий Е.С., Волик М.В., Тагиров А.М. Математическое моделирование распространения загрязняющих веществ, выбрасываемых автотранспортом // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН, № 6(62), 2014 г. – с.23-32.
- [3]. Uehara K., Murakami S., Oikawa S., Wakamatsu S. Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyon // Atmospheric Environment. 2000. V. 34. P. 1533.
- [4]. Kastner-Klein P., Fedorovich E., Rotach M.W. A wind tunnel study of organised and turbulent air motions in urban street canyons // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2001. V. 89. P. 849–861.

Investigation of the effect of the length of the street on the flow of air in them

^{1,2} M. Volik <volikmv@mail.ru>

¹ *Financial University under the Government of the Russian Federation,
7, Molodegnaya st. , Republic of North Ossetia-Alania,
Vladikavkaz, 362002, Russia*

² *South Mathematical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian
Academy of Sciences and the Government of the Republic of North Ossetia-Alania,
22, Marcus st., Republic of North Ossetia-Alania, Vladikavkaz, 362027, Russia*

Abstract. The paper compares the results of mathematical modeling of aerodynamics typical urban developments with different length of the streets. The calculations were performed using the redistributable package OpenFoam and remote console access to the control node computing cluster BL2x220 Cluster Console <https://unihub.ru/resources/bl2x220cc> Web-laboratory Unihub (www.unihub.ru) program "University cluster" (www.unicluster.ru). Consider a single street with houses of the same height at its sides, a single street with houses of different heights at its sides and two parallel streets located on a hillside. Comparison of simulation results in two-dimensional and three-dimensional approximation showed that the length of the street has a significant impact on the qualitative and quantitative flow pattern inside the streets and on buildings.

Keywords: mathematical modeling; aerodynamics; urban canopy; OpenFoam.

References

- [1]. Kraposhin M.V., Samovarov O.I., Strizhak S.V. Paket OpenFoam: chislennoe modelirovanie zadach MSS [Package OpenFoam: numerical simulation of continuum mechanics] // Materialy shkoly-seminara «Osnovy ispol'zovaniya OpenFoam, Salome, ParaView» [Materials the school-seminar "Basics of using OpenFoam, Salome, ParaView"], https://unihub.ru/tools/unicfdc1/svn/trunk/Version2/Pdf/day1_2_4-OpenFOAM-Base.pdf.
- [2]. Kamenetskiy E.S., Volik M.V., Tagirov A.M. Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya zagryaznyayushchikh veshchestv, vybrasyvaemykh avtotransportom [Mathematical modeling of pollutants dispersion emitted by cars] // Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN [News Kabardino-Balkar Scientific Center of RAS], № 6(62), 2014 g. – s.23-32.
- [3]. Uehara K., Murakami S., Oikawa S., Wakamatsu S. Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyon // Atmospheric Environment. 2000. V. 34. P. 153.
- [4]. Kastner-Klein P., Fedorovich E., Rotach M.W. A wind tunnel study of organised and turbulent air motions in urban street canyons // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2001. V. 89. P. 849–861.