

УДК 551.559, 504.3.054

DOI: 10.23671/VNC.2016.4.20896

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ УЛИЦ И ВЫСОТЫ ДОМОВ НА ДВИЖЕНИЕ ВОЗДУХА

© 2016 М. В. Волик^{1,2}, Е. С. Каменецкий², д.ф.-м.н., проф., А. Г. Кусраев³, д.ф.-м.н., проф., Н. С. Орлова^{1,2}, к.т.н., Ш. С. Хубежты², д.ф.-м.н., проф.

¹Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, 362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Молодежная, 7, e-mail: volikmv@mail.ru;

²Южный математический институт – филиал ФГБУН ФНЦ «Владикавказский научный центр Российской академии наук», 362027, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркуса, д. 22, e-mail: esk@smath.ru;

³ФГБУН ФНЦ «Владикавказский научный центр Российской академии наук (ВНЦ РАН), 362027, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркуса, 22, e-mail: KAG@smath.ru

В работе проводится сравнение результатов математического моделирования аэродинамики уличных каньонов. Исследовано влияние длины уличного каньона и высоты домов на характеристики воздушного потока в городской застройке. Показано, что изменение конфигурации городской застройки приводит не только к количественному, но и к существенному качественному изменению картины течения воздуха и его скорости. Результаты могут быть использованы для решения широкого класса геолого-геофизических и геоэкологических задач (прогнозирование и оценка последствий чрезвычайных ситуаций, концентраций загрязняющих веществ и др.).

Ключевые слова: геолого-геофизические задачи, ландшафт, математическое моделирование; аэродинамика; уличный каньон; движение воздуха.

Исследование распространения газообразных загрязняющих веществ, выбрасываемых автомобилями, число которых катастрофически увеличивается на улицах городов, а также стационарных или аварийных выбросов производственными предприятиями является одной из приоритетных научных задач, направленных на обеспечение экологической безопасности страны [О приоритетных..., 2014]. Величина концентрации загрязняющих веществ зависит не только от интенсивности движения автотранспорта, но и от характеристик воздушного потока в городской застройке. Для определения областей, в которых могут скапливаться загрязняющие вещества необходимо получить картину течения воздуха внутри улиц и над ними [Волик, 2014, 2016; Каменецкий и др., 2014; Орлова, Волик, 2015; Britter, Hanna, 2003; Hong Cheng, 2002; Kastner-Klein, Rotach, 2004; Oke, 1988].

Расчет на ветровые нагрузки является одной из основных при проектировании зданий и сооружений, в особенности, повышенной этажности. Используемые на практике методики рассматривают здание независимо от окружающей среды, однако городской ландшафт может оказывать значительное влияние на динамические характеристики ветровых нагрузок.

В настоящее время математическое моделирование аэродинамики городской застройки позволяет с минимальными затратами выявлять и решать задачи экологического характера. Современная вычислительная техника позволяет осуществлять трехмерное моделирование элементов городской застройки.

Такое моделирование:

- позволяет визуализировать пространственную информацию в трехмерные модели объектов для решения задач проектирования, реконструкции, ремонта конкретных объектов инфраструктуры на участках градостроительной деятельности,
- является инструментом визуально-ландшафтного анализа для определения возможностей и путей адаптации планируемых градостроительных вмешательств,
- позволяет выполнить мониторинг объектов во времени: современное состояние, неосуществленные проектные решения или перспективные проектные предложения.

Трехмерное моделирование физических процессов в городской застройке используется при решении задач прогнозирования и оценки рисков последствий чрезвычайных ситуаций, определения зон высоких скоростей ветра и концентраций загрязняющих веществ и т. д.

Использование свободного программного обеспечения – открытых пакетов OpenFoam (Open Field Operation and Manipulation), Dolphyn, Salome, Engrid, Paraview и других – позволяет существенно снизить финансовые и временные затраты при решении трехмерных задач. 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). Для уменьшения затрат машинного времени при проведении вычислительных экспериментов были использованы многопроцессорные технологии и удаленный доступ к ресурсам Web-лаборатории UniHUB (www.unihub.ru) по программе «Университетский кластер» (www.unicluster.ru). Структура OpenFoam является полностью модульной, каждый этап численного решения базовых уравнений: 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, контроль качества сетки выносятся в отдельный модуль. В качестве постпроцессора для визуализации результатов расчетов использован 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. [Крапошин, 2016]

Решаемая в OpenFoam задача обязательно содержит: начальные и граничные условия; расчетную сетку, а также физические свойства и параметры интегрирования уравнений [Волик, 2014, 2016; Каменецкий и др., 2014; Крапошин, 2016; Орлова, Волик, 2015]. 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

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (1)$$

и уравнение изменения импульса

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \vec{U} - \nabla \cdot ((\nu + \nu_t) \nabla \vec{U}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P, \quad (2)$$

где U – вектор скорости (м/с), t – время (с), P – давление (м²/с²), ρ – плотность воздуха (1,2 кг/м³), ν – ламинарная вязкость (м²/с), ν_t – турбулентная вязкость (м²/с).

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

$$\frac{\partial}{\partial t} K + \frac{\partial}{\partial x_i} (KU_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + P_k - \varepsilon \quad (3)$$

и скорости ее диссипации

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \tilde{N}_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{K}, \quad (4)$$

где K – энергия турбулентности (м²/с²), ε – скорость диссипации энергии турбулентности (м²/с³), P_k – скорость порождения энергии турбулентности.

Турбулентная вязкость определяется как: $i_t = \tilde{N}_\mu \frac{K^2}{\varepsilon}$

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

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

где U_x', U_y', U_z' – усредненные квадраты пульсационных компонент скорости в направлениях x , y и z соответственно. Предполагалось, 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 $K = 0.375$ (м²/с²), $\varepsilon = 0.001$ (м²/с³). [Волик, 2014, 2016; Каменецкий и др., 2014; Орлова, Волик, 2015]

В расчетах использованы следующие безразмерные константы $C_\mu = 0.09$, $\kappa = 0.41$, $E = 9.8$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{3\varepsilon} = 0.09$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$. [Волик, 2014, 2016; Каменецкий и др., 2014; Орлова, Волик, 2015].

Использовались следующие граничные условия:

- для скорости: на входе фиксированное значение (1 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 $K - \dot{a}$ модели, на нижней границе (стенках) – использовалась пристеночная функция `nutkWallFunction`;
- 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`;
- для скорости диссипации энергии турбулентности: на входе – фиксированное значение $\varepsilon = 0,001$, на выходе и верхней границе – нулевой градиент ($\frac{\partial \dot{a}}{\partial n} = 0$), на нижней границе – пристеночная функция `epsilonWallFunction` [Волик, 2014,

2016; Каменецкий и др., 2014; Орлова, Волик, 2015].

Было проведено сравнительное исследование трех конфигураций городской застройки. Первая из них состояла из расположенных последовательно по потоку трех домов, имевших форму кубов, размеры которых составляли $1 \text{ м} \times 1 \text{ м} \times 1 \text{ м}$ (рис. 1). В работе [Волик, Солаева, 2013] показано, что изменение размеров домов при сохранении соотношения их высоты и ширины не оказывает значительного влияния на характер течения воздуха внутри улиц и за застройкой. При этом использование меньших размеров домов и, соответственно, расчетной области позволяет значительно уменьшить время расчетов.

Во всех вариантах расчетов моделировался поток воздуха слева направо. Ось X была направлена перпендикулярно улицам, ось Y – вдоль улиц, ось Z – вертикально вверх. Расстояние от входной границы до первого дома выбиралось равным десяти его высотам, расстояние от третьего дома до выходной границы – двадцати высотам, расстояние от нижней границы расчетной области до верхней – шести высотам, расстояние от застройки до боковых границ – двум высотам, расстояние между домами – двум высотам. Серия вычислительных экспериментов проводилась для интервала времени от 0 до 20 с. (с шагом 0,001 с.).

На рис. 1 показаны линии тока для фрагмента расчетной области. Видно, что поток затягивается в промежуток между домами таким образом, что на их подветренной стороне образуются вихри почти симметричные относительно плоскости проходящей через центр домов вдоль основного потока. Эти вихри занимают примерно половину расстояния между домами. Дома на наветренной стороне обтекаются воздухом сверху и сбоку без образования вихрей. Над домами наблюдаются небольшие вихревые структуры.

Рассмотренная конфигурация городской застройки, состоящая из трех последовательно расположенных домов в форме куба, чаще всего используется для тестирования математических моделей и экспериментальных исследований в аэродинамических трубах.

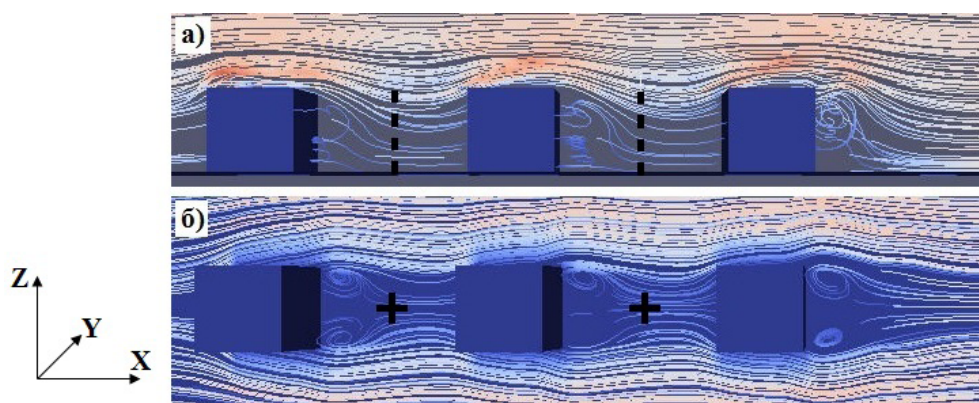


Рис. 1. Линии тока для фрагмента расчетной области, состоящей из трех домов в форме куба: вид сбоку (а) и сверху (б)

На рис. 2 представлены линии тока, полученные при расчетах аэродинамики городской застройки, состоящей из расположенных последовательно по потоку трех домов в форме параллелепипедов, размеры которых составили $1 \text{ м} \times 10 \text{ м} \times 1 \text{ м}$.

В этом случае внутри улиц образуются спиралевидные вихри не симметричные относительно вертикальной плоскости, проходящей через центр домов. Поток воздуха затекает внутрь улиц в основном сбоку. Вихри над домами не образуются. Картина течения существенно нестационарна. Оси вращения вихревых структур

со временем меняют свою ориентацию в пространстве.

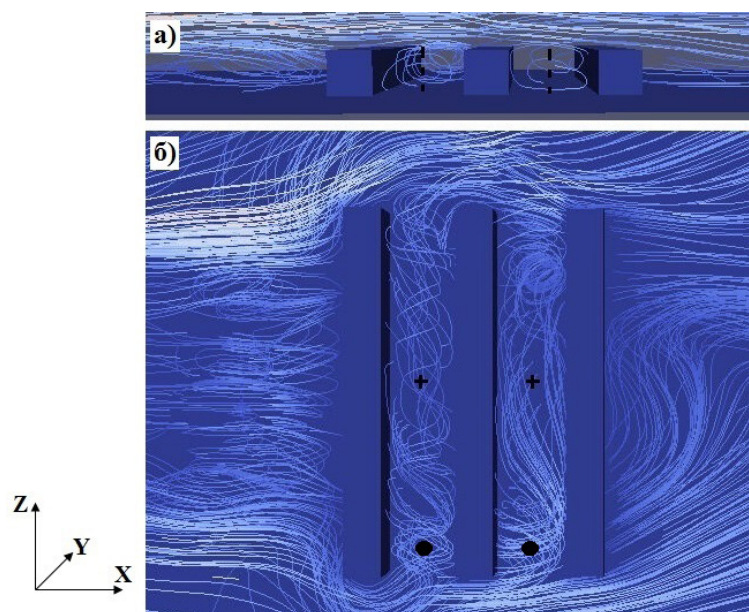


Рис. 2. Линии тока для фрагмента расчетной области, состоящей из трех домов одинаковой высоты в форме параллелепипеда: вид сбоку (а) и сверху (б)

В третьем варианте расчетов исследовалось обтекание застройки из трех параллельных домов, средний из которых имел большую высоту. На рис. 3 представлен фрагмент расчетной области для такой городской застройки. Размеры первого и третьего домов составили $1\text{ м} \times 10\text{ м} \times 1\text{ м}$, а второго по потоку дома – $1\text{ м} \times 10\text{ м} \times 2\text{ м}$.

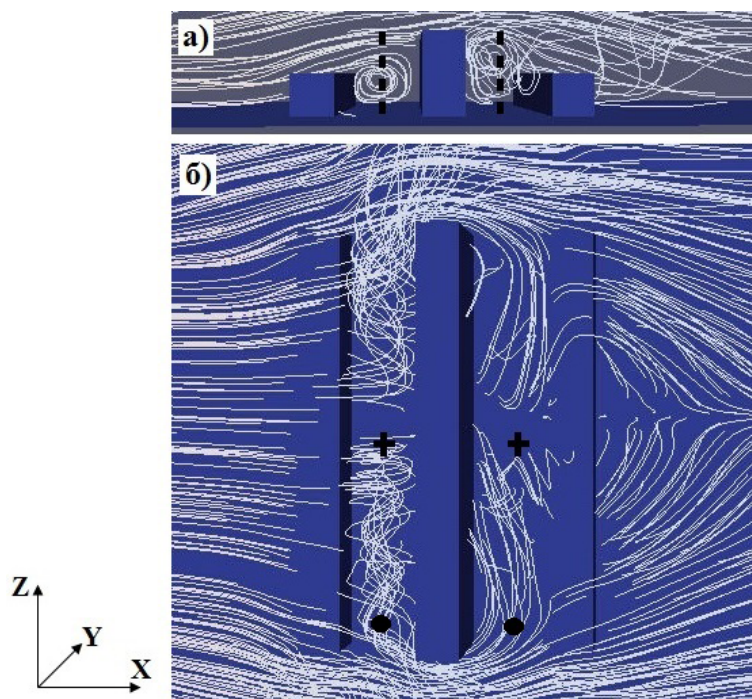


Рис. 3. Линии тока для фрагмента расчетной области, состоящей из трех домов в форме параллелепипеда, с высоким домом между улиц: вид сбоку (а) и сверху (б)

В этом случае вихревые структуры между домами более симметричны. В уличный каньон перед более высоким домом воздух затекает сверху. В этом каньоне возникают вихри, из которых воздух выносится в улицы, ориентированные вдоль направления ветра над домами. В улице за высоким домом возникают сложные

многовихревые структуры, в которые воздух засасывается из поперечных улиц, а затем вытекает из уличного каньона над более низким домом, расположенным на наветренной стороне улицы.

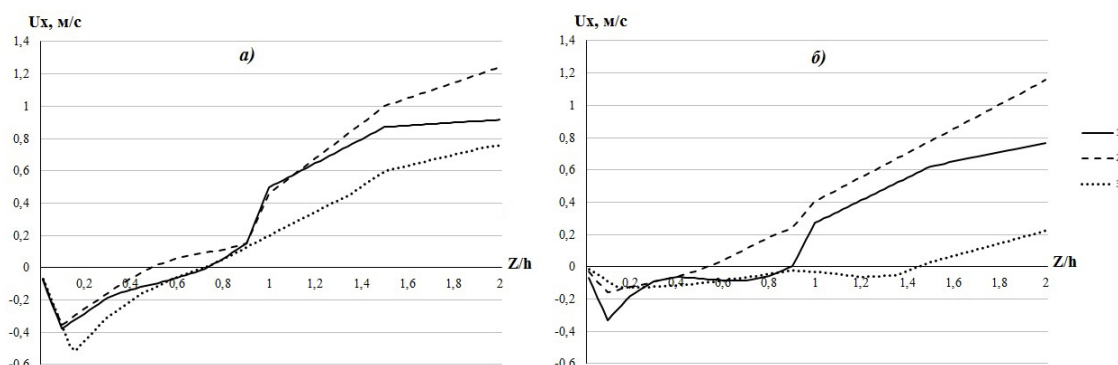


Рис. 4. Распределение горизонтальной составляющей скорости воздуха по высоте в центре улиц, расположенных выше (а) и ниже (б) по потоку. Кривые 1 соответствуют результатам расчетов для городской застройки с домами в форме кубов, кривые 2 – с домами в форме параллелепипедов одинаковой высоты, кривые 3 – с высоким домом между улиц.

На рис. 4 представлено изменение горизонтальной составляющей скорости воздуха по высоте в центре исследуемых улиц (на рис. 1-3 рассматриваемое сечение отмечено + и пунктирной линией). В качестве масштаба длины h выбрана высота одинаковых домов. Кривые 1 соответствуют результатам расчетов для городской застройки, состоящей из трех домов в форме кубов одинаковой высоты, кривые 2 – для городской застройки, состоящей из трех домов в форме параллелепипедов одинаковой высоты, кривые 3 – для городской застройки, состоящей из трех домов в форме параллелепипедов с высоким домом между улицами.

Видно, что изменение горизонтальной составляющей скорости в этих сечениях в целом подобны во всех вариантах расчетов. В случае длинных улиц с одинаковой высотой домов по их сторонам в этих сечениях наблюдается явно выраженный вихрь с горизонтальной осью вращения. При застройке в виде кубов или с более высоким домом внутри улиц в этих сечениях течение в основном возвратное. Важно отметить, что скорость возвратного течения в улице, расположенной ниже по потоку для длинных улиц независимо от высоты дома, разделяющего улицы, существенно ниже, чем в улице, расположенной выше по потоку. Это значит, что проветриваемость параллельных улиц существенно отличается и причиной этих отличий не является только экранирование воздушного протока более высокими домами.

На рис. 5 представлено изменение горизонтальной составляющей скорости воздуха по высоте на краю исследуемых улиц с домами в форме параллелепипедов (на рис. 2-3 рассматриваемое сечение отмечено • и пунктирной линией и находится на расстоянии 1 м от края улиц). Кривые 1 соответствуют результатам расчетов для городской застройки, состоящей из трех домов в форме параллелепипедов одинаковой высоты, кривые 2 – для городской застройки, состоящей из трех домов в форме параллелепипедов с высоким домом между улицами.

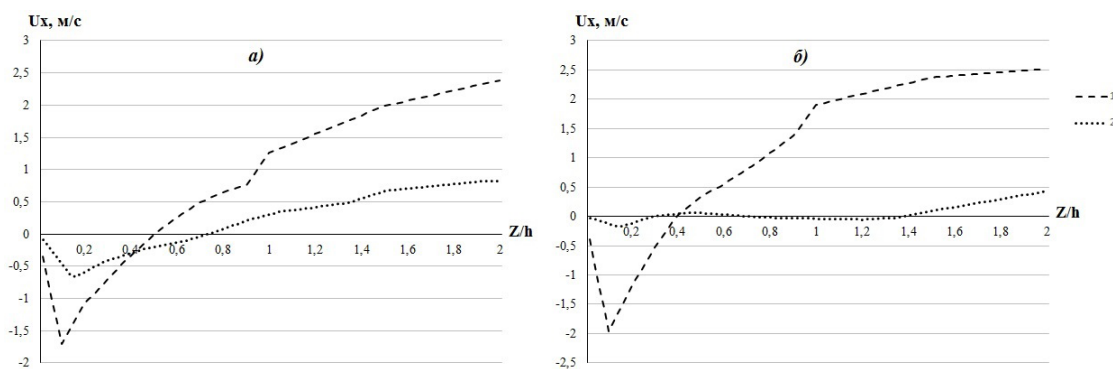


Рис. 5. Распределение горизонтальной составляющей скорости воздуха по высоте в центре сечения вдоль оси X на расстоянии 1 м от края улиц, расположенных выше (а) и ниже (б) по потоку. Кривые 1 соответствуют результатам расчетов для городской застройки с домами в форме параллелепипедов одинаковой высоты, кривые 2 – с высоким домом между улиц.

На краю улиц, расположенных выше по потоку, в обоих случаях образуются вихри с горизонтальной осью вращения. В случае если, улицы разделяются более высоким домом, интенсивность вихря меньше и центр его расположен выше, почти на уровне крыш низкого дома. В том же сечении улицы, расположенной ниже по потоку, вихрь с горизонтальной осью вращения образуется только при одинаковой высоте домов. Если высота домов разная, горизонтальная скорость воздуха в этом сечении практически равна нулю, что может свидетельствовать о вихревом движении, ось которого расположена в плоскости XZ . Полученные результаты указывают на ухудшение проветриваемости улиц при разной высоте домов.

Таким образом, результаты приведенных вычислительных экспериментов показали, что изменение конфигурации городской застройки приводит не только к количественному, но и к существенному качественному изменению картины течения воздуха и его скорости. Это означает, что при проектировании застройки новых микрорайонов или перепланировки старых целесообразно проводить трехмерное математическое моделирование для сравнения предполагаемых вариантов застройки с точки зрения рассеяния газообразных загрязняющих веществ, выбрасываемых автотранспортом и другими источниками загрязнений, а также уровня комфорта проживания населения.

Литература

1. Волик М.В. Исследование влияния длины улиц на течение воздуха в них // Труды ИСП РАН. – Том 26, вып. 5. – 2014. – С. 201-211.
2. Волик М.В. Численное моделирование распространения загрязняющих веществ, выбрасываемых низко расположенными источниками, внутри улиц // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2016. – № 1 (69). – С. 20-27.
3. Волик М.В., Солаева З.Г. Использование информационных технологий для математического моделирования течения воздуха // Информационные технологии в науке, бизнесе и образовании (Технологии безопасности): Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – М.: Изд-во Финансового университета, 2013. – С.147-150.
4. 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.

5. 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/unicfdc1/svn/trunk/Version2/Pdf/day1_2_4-OpenFOAM-Base.pdf (дата обращения 13.11.2016).

6. О приоритетных научных задачах, для решения которых требуется задействовать возможности федеральных центров коллективного пользования научным оборудованием. 08.02.2014 г. URL: <http://government.ru/orders/10326/#dev> (дата обращения 13.11.2016).

7. Орлова Н.С., Волик М.В. Моделирование распространения загрязняющих веществ, выбрасываемых низко расположенными источниками после их устранения // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Международная научная школа молодых ученых; 11-12 ноября 2015 г., Москва: Сборник тезисов. – М.: МАКС Пресс, 2015. – С. 117-119.

8. Britter R. E., Hanna S. R. (2003) Flow and Dispersion in Urban Areas // Annual Review of Fluid Mechanics. Vol. 35, pp. 469-497.

9. Hong Cheng, Castro I. P. (2002) Near wall flow over Urban-like roughness // Boundary-Layer Meteorology. Vol. 104, pp. 229-259.

10. Kastner-Klein P., Rotach M. W. (2004) Mean flow and turbulence characteristics an Urban roughness sublayer // Boundary-Layer Meteorology. Vol. 111, pp. 55-84.

11. Oke T. R. (1988) Street Design and Urban Canopy Layer Climate // Energy and Buildings. Vol. 11 (1988), pp. 103-113.

DOI: 10.23671/VNC.2016.4.20896

STUDY OF STREETS LENGTH AND HEIGHT OF HOUSES INFLUENCE ON THE AIR MOVEMENT

© 2016 M. V. Volik^{1,2}, E. S. Kamenetsky², Sc. Doctor (Phys.-Math.), prof.,
A. G. Kusraev³, Sc. Doctor (Phys.-Math.), prof., N. S. Orlova^{1,2}, Sc. Cand. (Tech.),
Sh. S. Khubezhty², Sc. Doctor (Phys.-Math.), prof.

¹Financial University under the Government of RF, Russia, 362002, Vladikavkaz,
Molodezhnaya street, 7, e-mail: volikmv@mail.ru;

²South Mathematical Institute of VSC RAS, Russia, 362027, Vladikavkaz, Markusa
street, 22, e-mail: esk@smath.ru;

³Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Russia, 362027,
Vladikavkaz, Markusa street, 22, e-mail: KAG@smath.ru

The paper compares the results of street canyons aerodynamics mathematical modeling. The effect of the length of the street canyon and the height of the houses on characteristics of air flow in urban canopy is investigated. It is shown that the change in the configuration of urban canopy leads not only to a quantitative but also a significant qualitative change in the pattern and speed of air flow. Results can be used to solve a wide range of geologic-geophysical and geocological problems (prediction and assessment of consequences of emergency situations, concentrations of polluting substances, etc.).

Keywords: geological-geophysical tasks, landscape, mathematical modeling; aerodynamics; street canyon; air flow.