Е. А. Данилкин, Д. В. Лещинский, А. В. Старченко, Микромасштабная математическая модель неизотермического турбулентного течения и переноса пассивной газообразной примеси в уличном каньоне,
Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех., 2023, номер 85, 117–131

https://www.mathnet.ru/vtgu1033

ВЕСТНИК ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2023 Математика и механика № 85
Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics

Научная статья
УДК 519.6, 532.5
doi: 10.17223/19988621/85/9

Микромасштабная математическая модель неизотермического турбулентного течения и переноса пассивной газообразной примеси в уличном каньоне

Евгений Александрович Данилкин[1], Дмитрий Викторович Лещинский[2], Александр Васильевич Старченко[3]

[1, 2, 3] Томский государственный университет, Томск, Россия
[1] ugin@math.tsu.ru
[2] 360flip182@gmail.com
[3] starch@math.tsu.ru

Аннотация. Работа посвящена описанию, апробации и применению разрабатываемой микромасштабной математической модели неизотермического турбулентного течения и переноса пассивной газообразной примеси в уличных каньонах. В качестве результатов ее успешного применения рассматриваются стационарные трехмерные турбулентные течения в ветровом туннеле с нагреваемой выемкой и в канале-каверне с подачей примеси, для которых имеются измерения. Рассчитаны и проанализированы поля скорости ветра и концентрации примеси при частичном или полном нагреве наветренной стенки уличного каньона.
Ключевые слова: моделирование турбулентности, уличный каньон, неизотермичность, перенос примеси, численные расчеты

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-02-2023-943).

Для цитирования: Данилкин Е.А., Лещинский Д.В., Старченко А.В. Микромасштабная математическая модель неизотермического турбулентного течения и переноса пассивной газообразной примеси в уличном каньоне // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 85. С. 117–131. doi: 10.17223/19988621/85/9

Original article

A microscale mathematical model of a non-isothermal turbulent flow and transport of a passive gaseous pollutant in a street canyon

Evgeniy A. Danilkin[1], Dmitriy V. Leshchinskiy[2], Aleksandr V. Starchenko[3]

[1, 2, 3] Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation
[1] ugin@math.tsu.ru

[2] 360flip182@gmail.com
[3] starch@math.tsu.ru

Abstract. This work is devoted to the description and testing of the developed numerical microscale mathematical model of a non-isothermal turbulent flow and transport of a passive gaseous pollutant in street canyons and city blocks. The model is successfully applied to consider three-dimensional turbulent steady flows in a wind tunnel with a heated groove and in a cavern channel with a pollutant supply, for which measurements are available. A comparison of the calculated results, experimental data, and calculations obtained using ANSYS Fluent demonstrates the validity of the numerical model. The model is used to calculate and analyze the fields of wind speed and pollutant concentration, as well as the integral characteristics of the pollutant concentration in a street canyon as a whole and in a breathing zone (up to 2 meters above the canyon bottom) with partial or overall heating of the windward wall of the canyon. The flow structure and the observed maximum and average concentrations of the pollutants are found to depend significantly on the size of the heated part of the windward canyon wall.
Keywords: turbulence modeling, street canyon, non-isothermality, pollutant transport, numerical calculations

Acknowledgments: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-02-2023-943).

For citation: Danilkin, E.A., Leshchinskiy, D.V., Starchenko, A.V. (2023) A microscale mathematical model of a non-isothermal turbulent flow and transport of a passive gaseous pollutant in a street canyon. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 85. pp. 117–131. doi: 10.17223/19988621/85/9

Введение

Качество атмосферного воздуха в городах оказывает существенное влияние на качество жизни и здоровье человека. Исследования показывают, что ежегодно миллионы людей страдают от болезней, связанных с загрязнением окружающей среды и атмосферного воздуха [1]. Для обеспечения максимальной комфортности населения проектирование расположения жилых городских кварталов требует применения современных высокотехнологических решений как с точки зрения используемых строительных материалов, так и с точки зрения оценки последствий различных физических и метеорологических явлений с помощью высокоточных и надежных методов математического моделирования.

На микроклиматический комфорт современных городских кварталов и уличных каньонов в большей степени влияет автотранспорт, а точнее, выхлопные газы автомобилей. Исходя из скорости и направления ветра, а также интенсивности выбросов загрязняющих веществ автотранспортом, можно смоделировать, какой именно способностью к проветриванию будет обладать проектируемый уличный каньон. Актуальность исследований подобного рода подтверждается многочисленными научными статьями авторов из любой точки земного шара [2–6].

Микромасштабное (с разрешением несколько метров) моделирование атмосферного пограничного слоя в городской застройке представляет собой одно из важнейших современных направлений вычислительной механики и имеет большое научное значение. Моделирование течений в уличных каньонах и элементах городской застройки с использованием гидродинамических моделей турбулентности (RANS, LES, DES) активно развивается как у нас в стране, так и за рубежом [2–6]. За последние несколько десятилетий исследователи значительно продвинулись в части моделирования переноса вредных выбросов. В качестве важных параметров, влияющих на структуру течения и механизм распространения примеси, можно выделить метеоусловия (скорость и направления ветра), геометрические характеристики (соотношение сторон уличного каньона, форма крыши), расположение акустических экранов, «живых» и бетонных изгородей и других ограждений. Однако далеко не все аспекты задачи о переносе выбросов автотранспорта в уличных каньонах хорошо изучены: например, влияние солнечного нагрева ограничивающих уличный каньон поверхностей. Для этого нужны хорошо апробированные численные микромасштабные модели.

Данная работа посвящена верификации разрабатываемой микромасштабной математической модели неизотермического турбулентного течения и переноса пассивной газообразной примеси в уличных каньонах и городских кварталах и ее применению для исследования влияния солнечного нагрева наветренной стенки на аэродинамику и перенос примеси.

Постановка задачи

Рассматривается стационарное неизотермическое трехмерное турбулентное движение воздуха в уличном каньоне, который представляет собой протяженный участок улицы с параллельно расположенными высокими зданиями с обеих сторон (рис.1). По дороге между зданиями интенсивно движется автотранспорт, выбрасывающий в атмосферу продукты сгорания углеводородного топлива. Высота зданий (H) соизмерима с шириной улицы (W). Примесь считается химически инертной и не осаждается на образующих уличного каньона. Стены и дно уличного каньона могут иметь температуру, отличную от температуры окружающей среды. Это возможно в результате антропогенной деятельности или солнечного нагрева.

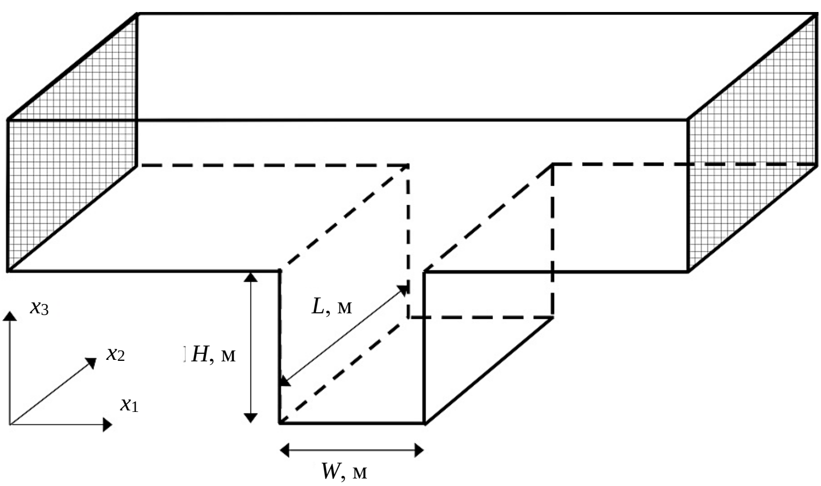

Рис. 1. Иллюстрация физической постановки задачи
Fig. 1. Illustration of the physical problem formulation

Математическая модель рассматриваемого физического процесса включает в себя осредненные по Рейнольдсу уравнения неразрывности, Навье–Стокса, теплообмена и переноса примеси [5]. Влияние силы плавучести на движение воздуха в уличном каньоне моделируется с помощью приближения Обербека–Буссинеска.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0; \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} - \frac{g_i(\bar{T} - T_0)}{T_0}; \quad i = 1, 2, 3; \tag{2}$$

$$\frac{\partial \bar{T}\bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(a \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial \overline{T' u_j'}}{\partial x_j}; \tag{3}$$

$$\frac{\partial \bar{c}\,\bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(D \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial \overline{c' u_j'}}{\partial x_j} + S_c, i = 1, 2, 3. \tag{4}$$

Здесь $\bar{u}_i, u_i'$ – осредненная и пульсационная компоненты (i = 1, 2, 3) вектора скорости, T – температура, p – давление, $g_i(0,0,-g)$ – компоненты ускорения свободного падения, c – концентрация примеси, S_c – интенсивность поступления примеси, ρ, ν, a, D – плотность, кинематическая вязкость, температуропроводность и коэффициент диффузии.

Замыкание системы уравнений проводится с использованием градиентно-диффузионной гипотезы Буссинеска и двухпараметрической k–ε модели [7], учитывающей влияние плавучести на характеристики турбулентности.

$$\overline{u_i' u_j'} = -\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) + \frac{2}{3}\delta_{ij} k; i, j = 1, 2, 3;$$

$$\overline{T' u_j'} = -\frac{\nu_t}{\mathrm{Pr}_t}\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}; \quad \overline{c' u_j'} = -\frac{\nu_t}{Sc_t}\frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j}; j = 1, 2, 3.$$

$$\frac{\partial k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + P + G - \varepsilon; \tag{5}$$

$$\frac{\partial \varepsilon \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\left(P + C_{\varepsilon 3} G\right) - C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k}; \tag{6}$$

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon; C_\mu = 0.09; \mathrm{Pr}_t = 0.9; Sc_t = 0.5; \tag{7}$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.22; \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = \tanh(|\bar{u}_3| / \sqrt{\bar{u}_1^2 + \bar{u}_2^2}); C_{\varepsilon 3} = 1.92;$$

$$P = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}; \qquad G = \delta_{i3}\frac{g_i}{T_0}\frac{\nu_t}{\mathrm{Pr}_t}\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i}.$$

В качестве граничных условий для системы уравнений (1)–(7) использовались:

– условия первого рода на входе в расчетную область;

– равенство нулю производных по нормали на верхней и боковых границах, а также на выходе из расчетной области;

– на твердых поверхностях условия прилипания и непротекания для соответствующих компонент скорости, равенство нулю производных по нормали от концентрации примеси и метод пристеночных функций для определения трения и теплового потока на стенках и турбулентных характеристик в пристеночных областях [8].

Численный метод решения задачи

Рассматриваемая задача решалась численно на неравномерной структурированной сетке, сгущающейся при приближении к твердым поверхностям. При построении конечно-разностных аналогов дифференциальных уравнений используется метод конечного объема, обеспечивающий точное выполнение закона сохранения массы на разностном уровне. Для учета препятствий используется метод фиктивных областей, в соответствии с которым компоненты скорости через грани конечного объема, принадлежащего препятствию, устанавливаются равными нулю. Аппроксимация конвективных членов уравнений переноса выполнена с использованием схемы MLU ван Лира [9], а диффузионных слагаемых – с помощью центральных разностей. Согласование полей скорости и давления с целью обеспечения выполнения уравнения (1) осуществлялось на основе процедуры SIMPLE [10]. Для источниковых членов конвективно-диффузионных уравнений (4)–(6) применялась линеаризация, обеспечивающая неотрицательность в процессе глобального итерационного процесса таких величин, как концентрация примеси, энергия турбулентности и скорость ее диссипации. Полученные в результате аппроксимации разностные схемы для одного уравнения конвекции-диффузии решались численно методом неполной факторизации Н.И. Булеева [11].

Верификация математической модели и численного метода

Для демонстрации достоверности получаемых с помощью модели (1)–(7) и разработанного численного метода результатов было рассмотрено два типа течений, для которых имеются экспериментальные результаты [12, 13].

В статье [12] проводились измерения в ветровом туннеле (канале прямоугольного сечения) с прямоугольной выемкой на его дне (рис. 2), моделирующей уличный каньон. На вход в канал поступал изотермический турбулентный поток. Число Рейнольдса, рассчитанное по средней скорости на входе и ширине или глубине выемки, составляло от 9 000 до 30 700. Кинематическая вязкость воздуха ν принята равной 1.5×10^{-5} м^2 с$^{-1}$. Стенки выемки подвергались нагреванию, причем могла нагреваться одна из стенок или несколько сразу. Температура стенок составляла 70, 90, 110 или 130°C. Температура потока до выемки имела значение 23°C. Измерения проводились для получения распределения компонент скорости, кинетической энергии турбулентности и в некоторых случаях температуры [12].

Для сравнения полученных экспериментальных данных с результатами расчетов по предлагаемой численной модели был выбран случай изотермического течения для числа Рейнольдса $\mathrm{Re} = U_{in}H/\nu = 30\,700$ и неизотермического течения с температурой подветренной стенки 70°C. Использование для тестирования модели экспериментальных данных, полученных для течений с меньшими значениями числа Рейнольдса, ограничивается рассматриваемым в расчетах применением метода пристеночных функций, а полученных для больших значений температуры стенки – применяемым приближением Обербека–Буссинеска для представления силы плавучести. В расчетах использовалась сетка 110 × 62 × 68. Скорость потока на входе в канал U_{in} = 2.32 м/с.

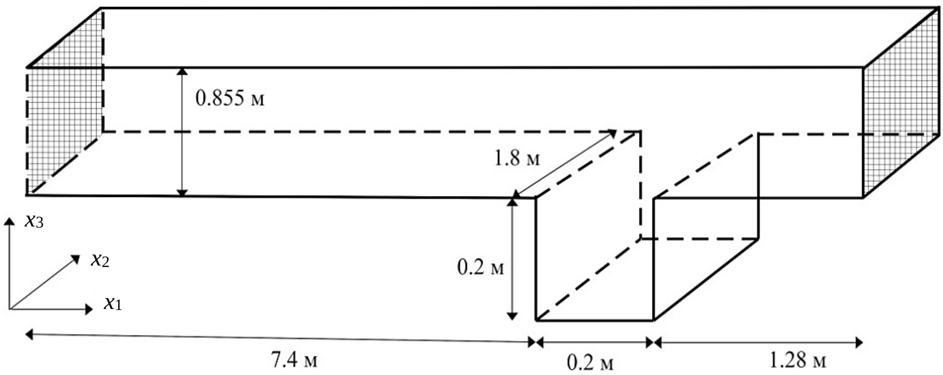

Рис. 2. Иллюстрация физической постановки задачи из эксперимента [12]
Fig. 2. Illustration of the physical problem formulation for the experiment in [12]

На рис. 3 представлены графики сравнения результатов расчетов с измерениями в сечении x_1/H = 0.5 (верхний ряд рисунков; предполагается, что положительные значения x_1 начинаются с левой (подветренной) границы каньона) и в сечении x_3/H = 0.5 (нижний ряд рисунков).

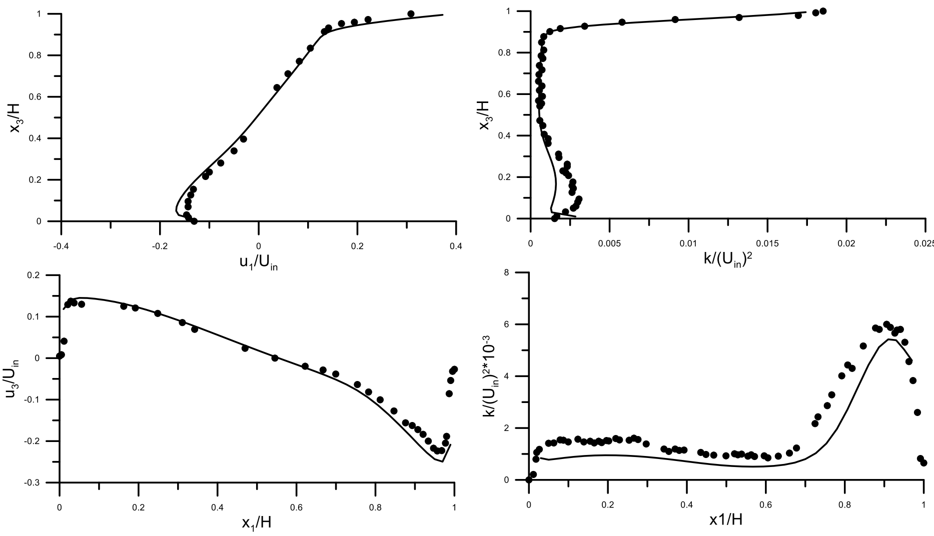

Рис. 3. Сравнение рассчитанных значений компонент скорости и кинетической энергии турбулентности в каньоне при изотермическом течении при Re = 30 700. Линии соответствуют расчетам, значки – измерениям [12]
Fig. 3. Comparison of the calculated velocity components and turbulent kinetic energy in a canyon with an isothermal flow at *Re* = 30700. The solid lines denote the calculated data, and the dotted lines, the measured data [12]

Иллюстрации показывают, что разрабатываемая численная модель турбулентного течения в уличных каньонах достаточно успешно предсказывает изменение компонент скорости и кинетической энергии турбулентности, хотя следует подчеркнуть, что модель несколько недооценивает кинетическую энергию турбулентности и интенсивность вращательного движения в каверне, предсказанные в расчетах, нежели наблюдается в экспериментах. Тем не менее характер изменения рассчитанных и измеренных значений в рассматриваемых сечениях согласуется достаточно хорошо.

На рис. 4 приведены результаты расчетов и экспериментальные данные из [12] для неизотермического течения при том же числе Рейнольдса. Причиной неизотермического течения в рассматриваемом случае был нагрев подветренной стенки каньона, ее температура составляла в эксперименте 70°С. Все другие параметры течения оставались прежними. Число Фруда $\mathrm{Fr} = U_{in}^2 T_{in}/gH(T_w - T_{in}) = 17.29$.

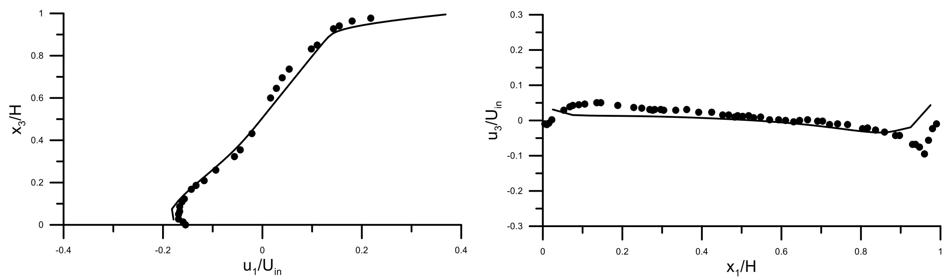

Рис. 4. Сравнение рассчитанных значений компонент скорости в каньоне при неизотермическом течении, Re = 30 700 и Fr = 17.29. Линии соответствуют расчетам, значки – наблюдениям [12]. Слева сечение $x_1/H = 0.5$; справа $x_3/H = 1$

Fig. 4. Comparison of the calculated velocity components in a canyon with a non-isothermal flow at $Re = 30700$ and $Fr = 17.29$. The solid lines denote the calculated data, and the dotted lines, the measured data [12]. Section $x_1/H = 0.5$ is on the left; section $x_3/H = 1$ is on the right

Также для проверки способностей разрабатываемой микромасштабной модели [5] качественно предсказывать распространение примеси был выбран эксперимент, описанный в работе [13]. В нем испытательный канал-каверна представлял собой модель уличного каньона. Геометрические размеры каньона заданы следующим образом: высота H и ширина $W = 1$ м, глубина $L = 0.3$ м (рис. 5). Для подачи и отвода воздуха использовались входной и выходной каналы высотой 0.2 м и длиной 0.6 м. Такая компоновка позволяла генерировать поля потока и концентрации в камере, которые можно считать двумерными или однородными в направлении оси Ox_2. Эксперимент проводился в изотермических условиях со скоростью набегающего потока 1.0 м/с при интенсивности турбулентности 4%. Кинематическая вязкость воздуха ν принята равной 1.5×10^{-5} м^2 с$^{-1}$. Число Рейнольдса составило 67 000. В экспериментальной установке на входе была установлена пористая плита для обеспечения однородных распределений зависимых переменных во входном сечении. Линейный источник примеси размером 0.01×0.26 м был размещен в центре нижней поверхности каньона. В качестве примеси рассматривалась смесь воздуха с этиленом с концентрацией 1.2%. Расход примеси составлял 3 л/мин. С помощью термоанемометра измерялись скорость и концентрация примеси в среднем сечении $x_2/H = 0.15$. В результате эксперимента сделаны замеры значений компонент скорости в сечениях $x_1/H = 0.5$ и $x_3/W = 0.5$, а также концентрации примеси в сечениях $x_1/H = 0.05$, $x_1/H = 0.5$, $x_1/H = 0.95$. Скорость была нормирована на среднюю скорость U_{in} в точке $(x_1, x_2, x_3) = (0.5H, 0.15H, 1.1H)$ [13].

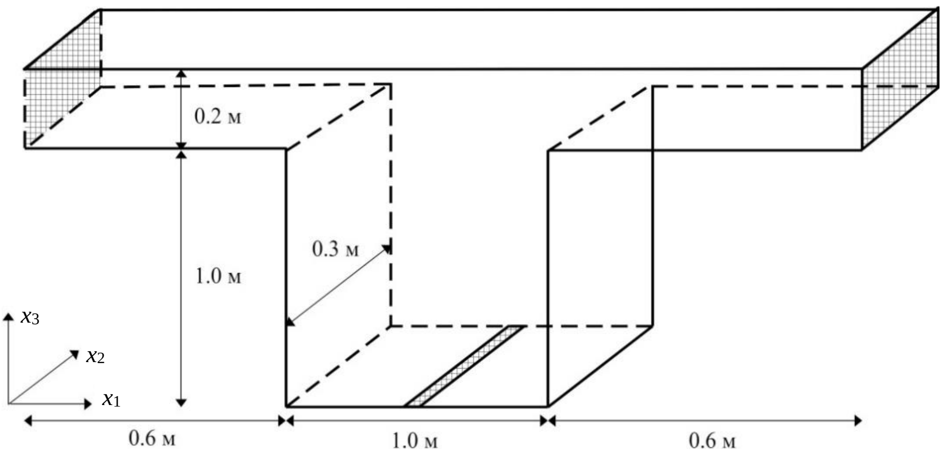

Рис. 5. Экспериментальная установка по изучению распространения примеси в уличном каньоне [13]
Fig. 5. Experimental setup for studying the pollutant spreading in a street canyon [13]

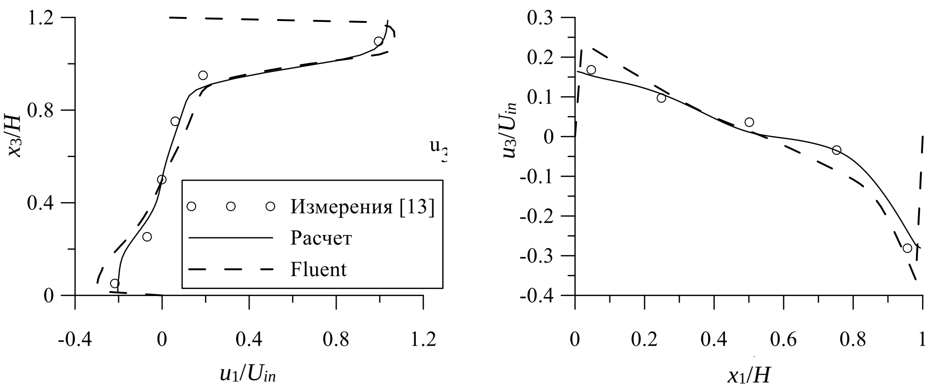

Рис. 6. Результаты сравнения рассчитанных значений компонент скорости с измерениями Kikumoto, Ooka [13] в среднем вертикальном сечении при $x_1/H = 0.5$ и $x_2/W = 0.5$(слева) и $x_2/W = 0.5$ и $x_3/H = 1.1$ (справа)
Fig. 6. Comparison of the calculated velocity components with the measured data by Kikumoto and Ooka [13] in the average vertical section at $x_1/H = 0.5$, $x_2/W = 0.5$ (on the left) and $x_2/W = 0.5$, $x_3/H = 1.1$ (on the right)

Для описанной выше геометрии и значений определяющих параметров с помощью модели (1)–(7) было выполнено численное исследование течения и переноса примеси. Для расчетов использовалась структурированная сетка размером $100 \times 100 \times 30$.

На рис. 6 представлены профили скорости вдоль вертикальной линии с координатами (x_1/H = 0.5 и x_2/H = 0.15) и горизонтальной (x_2/H = 0.15 и x_3/H = 1.1). Видно, что характер полученных расчетным путем профилей соответствует вращательному движению в каверне, наблюдаемому в [13]. Причем расчеты по развиваемой микромасштабной модели [5] хорошо согласуются с расчетами по программе ANSYS Fluent и измеренным значениям скорости из [13].

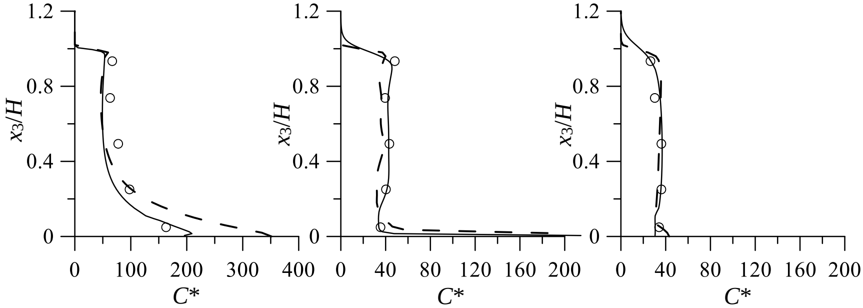

Рис. 7. Результаты сравнения рассчитанных значений безразмерной концентрации примеси с измерениями Kikumoto, Ooka [13] при x_1/H = 0.05 (слева), x_1/H = 0.5 (в центре), x_1/H = 0.95 (справа) и x_2/W = 0.5. Сплошная линия – расчет по (1)–(7), штриховая – расчет Fluent, значки – эксперимент

Fig. 7. Comparison of the calculated dimensionless concentration of a pollutant with the measured data by Kikumoto and Ooka [13] at x_1/H = 0.05 (on the left), x_1/H = 0.5 (in the middle), x_1/H = 0.95 (on the right) and x_2/W = 0.5. The solid line denotes the calculation by formulas (1)–(7); the dashed line, the calculation using ANSYS Fluent; and the circles, the experimental data

На рис. 7 приведены графики изменения безразмерной концентрации примеси $C^* = cU_{in}HL/Q$ вблизи подветренной стенки, в центре каверны и вблизи наветренной стенки. Здесь $L = 0.3H$; Q – объемный расход примеси. Анализируя рассчитанные с помощью (1)–(7) и с помощью ANSYS Fluent распределения концентрации примеси, можно отметить их хорошее согласование между собой и с измеренными значениями концентраций. Из рис. 7 видно, что наибольшие значения концентрации наблюдаются вблизи места эмиссии примеси и ближе к левому нижнему углу каверны. С наветренной стороны концентрация имеет наименьшие из рассмотренных и практически постоянные вдоль вертикальной стенки значения.

Исследование влияния частичного нагрева наветренной стенки на структуру турбулентного течения в уличном каньоне

Разрабатываемая микромасштабная математическая модель была применена для исследования неизотермического турбулентного течения и переноса пассивной газообразной примеси в уличном каньоне с частично нагретой стенкой здания с наветренной стороны (рис. 8). В численном эксперименте моделируется влияние нагрева стен здания от солнечного излучения при различной высоте светила над горизонтом. Предполагается, что уличный каньон (ось Ox_2) ориентирован на север, соответственно, ось Ox_1 – с запада на восток. При таком выборе системы координат в зависимости от высоты Солнца при его заходе будет освещаться только часть наветренной стороны, размеры которой будут уменьшаться при снижении высоты Солнца над горизонтом. Такие условия моделирования были выбраны в связи с тем, что при нагреве наветренной стороны [14–16] в каньоне может образовываться двухвихревая структура течения, приводящая к накоплению примеси у нижней границы каньона. Для выявления неблагоприятных условий проветривания каньона была проведена серия параметрических расчетов, в которых варьируемым параметром выступала доля высоты наветренной стены с повышенной температурой. Рассмотрены следующие варианты: температура стены совпадает с температурой окружающей среды (0–4), нагрета верхняя четверть стены (1–4), нагрета половина стены (2–4), нагреты три четверти стены (3–4), нагрета вся стена целиком (4–4).

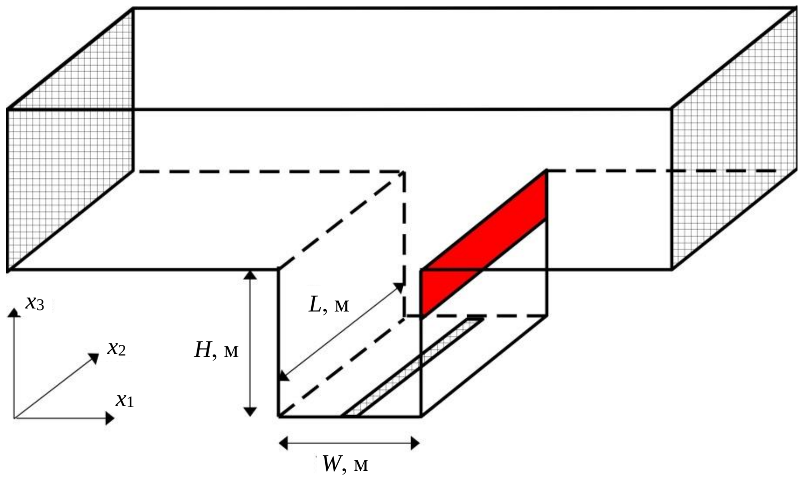

Рис. 8. Иллюстрация физической постановки задачи для варианта 1–4 (нагрета верхняя четверть наветренной стены каньона)
Fig. 8. Illustration of the physical problem formulation for the pattern 1–4 (the upper quarter of the windward wall of the canyon is heated)

Геометрические размеры каньона заданы следующим образом: высота H и ширина W = 20 м, глубина L = 30 м. В расчетах использовалась сетка 110 × 62 × 100 (рис. 8). Скорость набегающего потока U_{in} = 1.0 м/с. Температура окружающей среды принята равной 23°, разница температур между нагретой стеной и окружающей средой 20°. Кинематическая вязкость воздуха ν принята равной 1.5 × 10^{-5} м^2 с$^{-1}$. Линейный источник примеси размещен в центре нижней поверхности каньона.

На рис. 9 представлены векторные поля скорости на фоне изолиний концентрации примеси $C^* = cU_{in}HL/Q$ для рассмотренных вариантов нагрева наветренной стенки уличного каньона. В случае варианта 0–4 (отсутствие нагрева стен) под влиянием основного потока воздуха, движущегося над крышами зданий, в каньоне формируется вращательное течение (см. рис. 9). Сформировавшееся вихревое движение воздуха обеспечивает проветривание уличного каньона.

В таблице собраны максимальная, средняя в каньоне и средняя концентрация примеси в зоне дыхания людей (x_3 = 1.5 м).

Из рис. 9 видно, что нагрев наветренной образующей уличного каньона приводит к изменению структуры течения и характера распространения примеси внутри каньона. Нагрев верхней четверти приводит к замедлению интенсивности вращательного движения, как результат значение максимальной концентрации возрастает практически вдвое, также увеличивается средняя концентрация в зоне дыхания. Нагрев половины наветренной стенки уличного каньона приводит к изменению структуры течения. На рис. 9 (2–4) видно, что в нижнем углу у наветренной стороны формируется небольшой вихрь. Примесь затягивается в сформировавшийся вихрь и циркулирует в нем. Это приводит к значительному увеличению максимальной концентрации примеси в каньоне. Средняя концентрация в зоне дыхания также увеличивается.

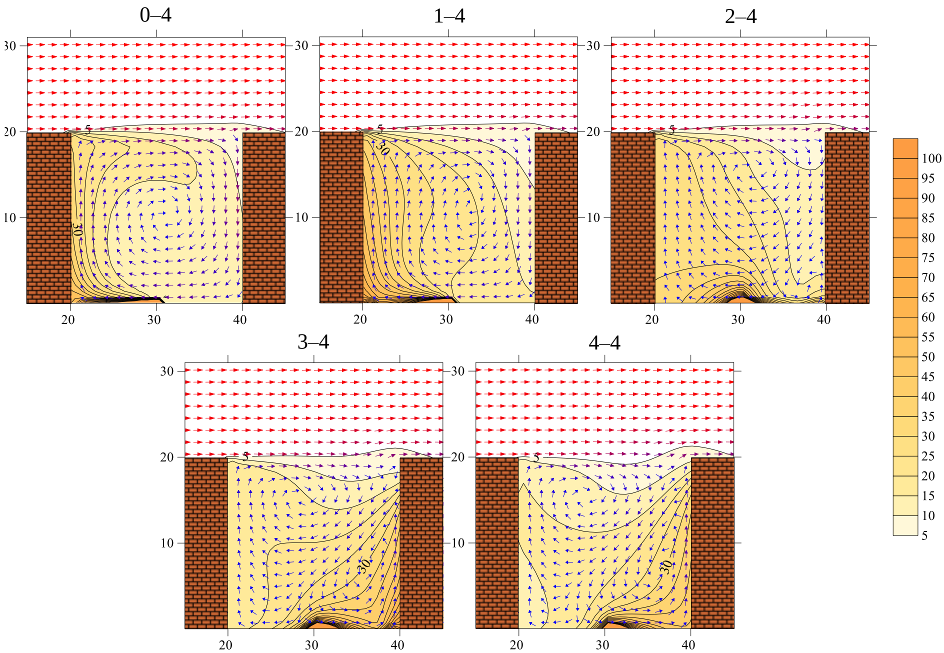

Рис. 9. Векторное поле скорости и изолинии концентрации примеси для рассматриваемых вариантов

Fig. 9. Velocity vector field and pollutant concentration isolines for the considered patterns

Максимальная, минимальная и средняя концентрации *C в каньоне и зоне дыхания**

Обозначение	Максимальная концентрация в каньоне	Минимальная концентрация в каньоне	Средняя концентрация в каньоне	Средняя концентрация в зоне дыхания
0–4	371.525	6.656	17.140	27.395
1–4	662.072	5.510	24.448	37.741
2–4	2 485.178	5.403	22.143	41.172
3–4	1 312.013	2.997	23.518	45.771
4–4	1 228.755	2.025	19.671	37.485

Дальнейшее увеличение зоны нагрева наветренной стенки каньона до соотношения 3/4 приводит к более существенному изменению структуры течения.

Восходящий поток теплого воздуха у нагретой образующей каньона конкурирует с основным направлением движения воздуха в каньоне. Это приводит к поджатию основного вихря и образованию вторичного вихря в зоне между основным вихрем и наветренной стеной здания. На рис. 9 (3–4) видно, что для такого варианта расчеты показывают изменение механизма проветривания каньона, примесь выносится вторичным вихрем. Как результат возрастает полученное расчетным путем значение максимальной концентрации примеси по сравнению с вариантами 0–4 и 1–4. В случае нагрева всей стены структура течения принципиально не меняется, но увеличивается интенсивность движения во вторичном вихре, что приводит к снижению максимальных и средних концентраций примеси.

Во всех случаях при увеличении доли нагретой части стены уменьшаются минимальные значения концентрации примеси, что в сочетании с увеличением максимальных и средних значений концентрации, по-видимому, косвенно свидетельствует об ухудшении перемешивания воздушных масс в каньоне.

Заключение

Представлена разрабатываемая численная микромасштабная модель неизотермического турбулентного течения и переноса пассивной газообразной примеси в уличных каньонах и городских кварталах. Модель опирается на трехмерные стационарные уравнения Рейнольдса, уравнения переноса примеси и теплообмена. Проблема турбулентного замыкания решается с помощью k–ε модели турбулентности и метода пристеночных функций. Задача решается численно на структурированных сетках методом конечного объема, с использованием монотонизированных схем второго порядка аппроксимации ван Лира, алгоритма SIMPLE Патанкара–Сполдинга и итерационного метода Булеева. Для демонстрации возможностей численной микромасштабной модели рассмотрено два случая трехмерных турбулентных течений, для которых имеются измерения: течение в ветровом туннеле с нагреваемой выемкой и течение в канале-каверне с подачей примеси. Сопоставление расчетов с экспериментальными данными и расчетами, выполненными с помощью ANSYS Fluent, показало хорошее качество разрабатываемой численной модели для исследования неизотермических турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах.

С помощью разработанной модели рассчитаны и проанализированы поля скорости ветра и концентрации примеси, а также интегральные характеристики концентрации примеси в уличном каньоне в целом и в зоне дыхания (до 2 м от дна каньона) при частичном или полном нагреве наветренной стенки уличного каньона. Получено, что структура течения и наблюдаемые максимальные и средние концентрации примеси существенно зависят от размера зоны нагретой части наветренной стены каньона.

Список источников

1. *Cohen A.J., Brauer M., Burnett R., Anderson H.R., Frostad J., Estep K., Balakrishnan K., Brunekreef B., Dandona L., Dandona R., Feigin V., Freedman G., Hubbell B., Jobling A., Kan H., Knibbs L., Liu Y., Martin R., Morawska L., Pope C.A. 3rd, Shin H., Straif K., Shaddick G., Thomas M., van Dingenen R., van Donkelaar A., Vos T., Murray C.J.L., Forouzanfar M.H.* Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient

air pollution: an analysis of data from the global burden of diseases study 2015 // Lancet. 2017. V. 389 (10082). P. 1907–1918. doi: 10.1016/S0140-6736(17)30505-6
2. *Nakajima K., Ooka R., Kikumoto H.* Evaluation of k-ε Reynolds stress modeling in an idealized urban canyon using LES // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2018. V. 175. P. 213–228. doi: 10.1016/j.jweia.2018.01.034
3. *Lateb M., Meroney R.N., Yataghene M., Fellouah H., Saleh F., Boufadel M.C.* On the use of numerical modelling for near-field pollutant dispersion in urban environments − A review // Environmental Pollution. 2016. V. 208, pt. A. P. 271–283. doi: 10.1016/j.envpol.2015.07.039
4. *Chew L.W., Glicksman L.R., Norford L.K.* Buoyant flows in street canyons: Comparison of RANS and LES at reduced and full scales // Building and Environment. 2018. V. 146. P. 77–87. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.09.026
5. *Старченко А.В., Данилкин Е.А., Лещинский Д.В.* Численное моделирование распространения выбросов автотранспорта в уличном каньоне // Математическое моделирование. 2022. Т. 34, № 10. С. 81–94. doi: 10.20948/mm-2022-10-05
6. *Мешкова В.Д., Дектерев А.А., Филимонов С.А., Литвинцев К.Ю.* SigmaFlow как инструмент исследования ветрового комфорта в условиях городской среды // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. 2022. № 15 (4). С. 490–504. doi: 10.17516/1999-494X-0398
7. *Henkes R.A.W.M., van der Flugt F.F., Hoogendoorn C.J.* Natural Convection Flow in a Square Cavity Calculated with Low-Reynolds-Number Turbulence Models // Int. J. Heat Mass Transfer. 1991. V. 34 (2). P. 377–388. doi: 10.1016/0017-9310(91)90258-G
8. *Launder B.E., Spalding D.B.* The numerical computation of turbulent flows. Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. V. 3 (2). P. 269–289. doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2
9. *Van Leer B.* Towards the ultimate conservative difference scheme. II. monotonicity and conservation combined in a second order scheme // Journal of Computational Physics. 1974. V. 14. P. 361–370. doi: 10.1016/0021-9991(74)90019-9
10. *Patankar S.* Numerical heat transfer and fluid flow. New York : Hemisphere Publ. Corporation, 1980. 214 p. doi: 10.1201/9781482234213
11. *Старченко А.В., Нутерман Р.Б., Данилкин Е.А.* Численное моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2015. 252 с.
12. *Allegrini J., Dorer V., Carmeliet J.* Wind tunnel measurements of buoyant flows in street canyons // Building and Environment. 2013. V. 59. P. 315–326. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.08.029
13. *Kikumoto H., Ooka R.* Large-eddy simulation of pollutant dispersion in a cavity at fine grid resolutions // Building and Environment. 2018. V. 127. P. 127–137. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.11.005
14. *Wang P., Zhao D., Wang W., Mu H., Cai G., Liao C.* Thermal Effect on Pollutant Dispersion in an Urban Street Canyon // Int. J. Environ. Res. 2011. V. 5 (3). P. 813–820. doi: 10.22059/IJER.2011.388
15. *Chen L., Hang J., Chen G., Liu S., Lin Y., Mattsson M., Sandberg M., Ling H.* Numerical investigations of wind and thermal environment in 2D scaled street canyons with various aspect ratios and solar wall heating // Building and Environment. 2021. V. 189. Art. 107510. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107525
16. *Старченко А.В., Данилкин Е.А., Семёнова А.А., Лещинский Д.В.* Численное моделирование турбулентного течения в уличном каньоне при смешанной конвекции // Девятая Сибирская конференция по параллельным и высокопроизводительным вычислениям : сб. ст. Томск : Изд. Дом Том. гос. ун-та, 2017. С. 70–77.

References

1. Cohen A.J., Brauer M., Burnett R., Anderson H.R., Frostad J., Estep K., Balakrishnan K., Brunekreef B., Dandona L., Dandona R., Feigin V., Freedman G., Hubbell B., Jobling A.,

Kan H., Knibbs L., Liu Y., Martin R., Morawska L., Pope C.A. 3rd, Shin H., Straif K., Shaddick G., Thomas M., van Dingenen R., van Donkelaar A., Vos T., Murray C.J.L., Forouzanfar M.H. (2017) Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the global burden of diseases study 2015. *Lancet*. 389. Article 10082. pp. 1907–1918. doi: 10.1016/S0140-6736(17)30505-6
2. Nakajima K., Ooka R., Kikumoto H. (2018) Evaluation of k-ε Reynolds stress modeling in an idealized urban canyon using LES. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 175. pp. 213–228. doi: 10.1016/j.jweia.2018.01.034
3. Lateb M., Meroney R.N., Yataghene M., Fellouah H., Saleh F., Boufadel M.C. (2016) On the use of numerical modelling for near-field pollutant dispersion in urban environments − A review. *Environmental Pollution*. 208(A). pp. 271–283. doi: 10.1016/j.envpol.2015.07.039
4. Chew L.W., Glicksman L.R., Norford L.K. (2018) Buoyant flows in street canyons: Comparison of RANS and LES at reduced and full scales. *Building and Environment*. 146. pp. 77–87. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.09.026
5. Starchenko A.V., Danilkin E.A., Leshchinskiy D.V. (2023) Numerical simulation of the distribution of vehicle emissions in a street canyon. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 15. pp. 427–435. doi: 10.20948/mm-2022-10-05
6. Meshkova V.D., Dekterev A.A., Filimonov S.A., Litvintsev K.Yu. (2022) SigmaFlow kak instrument issledovaniya vetrovogo komforta v usloviyakh gorodskoy sredy [SigmaFlow as a tool for studying wind comfort in an urban environment]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii – Journal of the Siberian Federal University. Engineering and Technology*. 15(4). pp. 490–504. doi: 10.17516/1999-494X-0398
7. Henkes R.A.W.M., van der Flugt F.F., Hoogendoorn C.J. (1991) Natural convection flow in a square cavity calculated with low-Reynolds-number turbulence models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 34. pp. 1543–1557. doi: 10.1016/0017-9310(91)90258-G
8. Launder B.E., Spalding D.B. (1974) The numerical computation of turbulent flows. *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 3(2). pp. 269–289. doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2
9. Van Leer B. (1974) Towards the ultimate conservative difference scheme. II. Monotonicity and conservation combined in a second order scheme. *Journal of Computational Physics*. 14. pp. 361–370. doi: 10.1016/0021-9991(74)90019-9
10. Patankar S. (1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere Publishing Corporation. doi: 10.1201/9781482234213
11. Starchenko A.V., Nuterman R.B., Danilkin E.A. (2015) *Chislennoe modelirovanie turbulentnykh techeniy i perenosa primesi v ulichnykh kan'onakh* [Numerical modeling of turbulent flows and pollution transport in street canyons]. Tomsk: Tomsk State University Press.
12. Allegrini J., Dorer V., Carmeliet J. (2013) Wind tunnel measurements of buoyant flows in street canyons. *Building and Environment*. 59. pp. 315–326. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.08.029
13. Kikumoto H., Ooka R. (2018) Large-eddy simulation of pollutant dispersion in a cavity at fine grid resolutions. *Building and Environment*. 127. pp. 127–137. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.11.005
14. Wang P. Zhao D., Wang W., Mu H., Cai G., Liao C. (2011) Thermal effect on pollutant dispersion in an urban street canyon. *International Journal of Environmental Research*. 5(3). pp. 813–820. doi: 10.22059/IJER.2011.388
15. Chen L., Hang J., Chen G., Liu S., Lin Y., Mattsson M., Sandberg M., Ling H. (2021) Numerical investigations of wind and thermal environment in 2D scaled street canyons with various aspect ratios and solar wall heating. *Building and Environment*. 190. Article 107510. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107525
16. Starchenko A.V., Danilkin E.A., Semenova A.A., Leshchinskiy D.V. (2017) *Chislennoe modelirovanie turbulentnogo techeniya v ulichnom kan'one pri smeshannoy konvektsii* [Numerical simulation of turbulent flow in a street canyon under mixed convection]. Tomsk: TSU Publishing House.

***Сведения об авторах*:**
Данилкин Евгений Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры вычислительной математики и компьютерного моделирования, старший научный сотрудник Регионального научно-образовательного математического центра Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: ugin@math.tsu.ru
Лещинский Дмитрий Викторович – старший преподаватель кафедры вычислительной математики и компьютерного моделирования, младший научный сотрудник Регионального научно-образовательного математического центра Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: 360flip182@gmail.com
Старченко Александр Васильевич – профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой вычислительной математики и компьютерного моделирования, ведущий научный сотрудник Регионального научно-образовательного математического центра Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: starch@math.tsu.ru

***Information about the authors*:**
Danilkin Evgeniy A. (Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Computational Mathematics and Computer Modelling, Senior Researcher of the Regional Scientific and Educational Mathematical Center, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ugin@math.tsu.ru
Leshchinskiy Dmitriy V. (Senior Lecturer of the Department of Computational Mathematics and Computer Modelling, Junior Researcher of the Regional Scientific and Educational Mathematical Center, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: 360flip182@gmail.com
Starchenko Aleksandr V. (Professor, Doctor of Physics and Mathematics, Head of Department of Computational Mathematics and Computer Modelling, Leading Researcher of the Regional Scientific and Educational Mathematical Center, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: starch@math.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 21.08.2023; принята к публикации 10.10.2023

The article was submitted 21.08.2023; accepted for publication 10.10.2023