

Научная статья

УДК 519.6, 532.5

doi: 10.17223/19988621/98/13

Численное моделирование влияния солнечного излучения на аэродинамику, теплообмен и перенос примеси в уличном каньоне

Александр Васильевич Старченко¹, Евгений Александрович Данилкин²,
Дмитрий Викторович Лещинский³

^{1, 2, 3} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ starch@math.tsu.ru

² ugin@math.tsu.ru

³ 360flip182@gmail.com

Аннотация. Исследуется влияние солнечного излучения на аэродинамику, теплообмен и перенос пассивной легкой примеси в 3D уличном каньоне. Для численного исследования привлекаются уравнения Рейнольдса, k - ϵ модель турбулентности с учетом плавучести, рассматривается теплообмен не только внутри уличного каньона, но и в ограждающих его твердых поверхностях. Результаты расчетов показали, что солнечный нагрев боковых поверхностей каньона может приводить к заметному изменению картины течения внутри каньона, которое сопровождается ухудшением качества воздуха в зоне дыхания пешеходов (до 2 м от дна каньона).

Ключевые слова: турбулентное неизоэтермическое течение, плавучесть, солнечное излучение, сопряженный теплообмен, уличный каньон, перенос примеси

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-02-2025-1728/2).

Для цитирования: Старченко А.В., Данилкин Е.А., Лещинский Д.В. Численное моделирование влияния солнечного излучения на аэродинамику, теплообмен и перенос примеси в уличном каньоне // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 98. С. 151–165. doi: 10.17223/19988621/98/13

Original article

Numerical simulation of the solar radiation effect on the aerodynamics, heat exchange, and pollution transfer in a street canyon

Aleksandr V. Starchenko¹, Evgeniy A. Danilkin², Dmitriy V. Leshchinskiy³

^{1, 2, 3} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ starch@math.tsu.ru

² ugin@math.tsu.ru

³ 360flip182@gmail.com

Abstract. This work investigates the influence of solar radiation on the aerodynamics, heat transfer, and pollutant dispersion in a street canyon. The main purpose of this study is to develop a mathematical model of aerodynamics, coupled heat transfer, and pollutant dispersion, as well as to examine the impact of solar heating on air quality in the pedestrian breathing zone (up to 2 m from the bottom of the canyon). The microscale model M2UE has been extended with a module for calculating coupled heat transfer between the ambient environment, building walls, and road surfaces. The study is based on the Reynolds equations and the $k-\varepsilon$ turbulence model with buoyancy effects, considering heat transfer both inside the canyon and within the solid enclosing surfaces. A numerical experiment was conducted to simulate the impact of solar heating of the windward building wall at various solar elevation angles. The results show that solar heating of the canyon walls significantly modifies the airflow structure, leading to deteriorated air quality in the pedestrian zone. It is found that the highest pollutant concentrations occur near the windward (eastern) side of the canyon when it is partially (~50%) or fully (~100%) heated by solar radiation during the daytime, whereas higher concentrations near the leeward side are observed in the absence of solar heating or under partial heating from the setting sun.

Keywords: non-isothermal turbulent flow, buoyancy, solar radiation, conjugate heat transfer, street canyon, pollution transfer

Acknowledgments: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-02-2025-1728/2).

For citation: Starchenko, A.V., Danilkin, E.A., Leshchinskiy, D.V. (2025) Numerical simulation of the solar radiation effect on the aerodynamics, heat exchange, and pollution transfer in a street canyon. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 98. pp. 151–165. doi: 10.17223/19988621/98/13

Введение

Одним из эффективных способов изучения процессов распространения автомобильных выбросов в городах является применение микромасштабных математических моделей [1], описывающих движение воздуха и транспортировку загрязняющих веществ. С помощью таких моделей можно предсказать распространение автомобильных выбросов в зависимости от конфигурации городской застройки и погодных условий. В последнее десятилетие при численном моделировании движения воздуха и распространения загрязняющих веществ в уличных каньонах исследователи из разных стран учитывали не только сложную аэродинамику турбулентного потока, но и неизотермический характер рассматриваемого процесса с учетом влияния силы плавучести.

В [2] авторы исследовали влияние отношения размеров уличного каньона (отношение высоты к ширине каньона, AR) и реального солнечного нагрева на конвективный теплоперенос и вентиляцию в полномасштабном двумерном уличном каньоне. Для анализа использовались результаты экспериментов, проводимых в ветровом туннеле, в котором перпендикулярно основному потоку располагались модели уличных каньонов с AR = 1.1, 2.4, 4, и 5.67. Также для исследования привлекался коммерческий пакет вычислительной гидродинамики и теплопередачи

ANSYS Fluent. При моделировании использовались уравнения Рейнольдса для несжимаемой жидкости, RNG k-eps модель турбулентности, метод пристеночных функций. Влияние силы плавучести в уравнениях движения рассматривалось в приближении Буссинеска. Для учета падающего солнечного излучения применялись модель трассировки солнечных лучей (Solar Ray Tracing Model) и P1-приближение радиационной модели переноса излучения. На границах учитывались конвективный теплообмен и рассеяние излучения. Перенос тепла внутри стен не рассматривался. Авторами получено хорошее согласование результатов моделирования и результатов эксперимента в ветровом туннеле. В работе было установлено, что при $AR = 1.1$ и 2.4 в 2D каньоне образуется один главный вихрь, способствующий хорошей вентиляции, в то время как при $AR = 4$ и $5,67$ образуется двухвихревая структура движения. Характер течения в уличном каньоне существенно зависит от условий солнечного нагрева поверхностей. Нагрев подветренной стороны каньона и его дна заметно усиливает вентиляцию. При значительном нагреве наветренной стороны или ее части (в глубоком каньоне) основной вихрь в каньоне деформируется, и в нижней части появляется дополнительный вихрь, способствующий накоплению примеси в зоне дыхания пешеходов [2].

В [3, 4] отмечается, что солнечный нагрев поверхностей глубокого уличного каньона ведет к образованию сложной многовихревой структуры течения в рассматриваемой области и чаще всего ухудшает проветриваемость внутри этого элемента городской застройки. Коэффициент конвективного теплообмена распределен неравномерно по поверхностям и зависит от солнечного излучения и геометрии каньона. Кроме того, отмечается, что при слабом ветре и низком уровне турбулентности температура внутри каньона увеличивается на $1-2^{\circ}\text{C}$. В [3, 4] использовались те же вычислительные технологии, что и в [2].

В [5] выполнено численное исследование влияния солнечного нагрева в уличном каньоне с $AR = 1$. Результаты показали, что важным является рассмотрение процессов аэродинамики и теплообмена в трехмерной постановке, поскольку структура течения при определенных условиях смешанной конвекции и излучения может значительно меняться в поперечном основном направлении с образованием двух- или многовихревых структур. Влияние естественной конвекции значительно при скорости ветра менее 2 м/с. В [5] при моделировании солнечного нагрева учитывались процессы теплообмена в ограничивающих каньон поверхностях. Также использовался пакет ANSYS Fluent.

В [6] влияние солнечного нагрева наветренной стены уличного каньона исследовалось путем задания повышенной температуры подсвечиваемой Солнцем части поверхности стенки. Использовался разрабатываемый авторами оригинальный программный комплекс M2UE (Microscale Model of Urban Environment) [1], в котором численно решаются трехмерные уравнения Рейнольдса, замкнутые с использованием двухпараметрической модели турбулентности, учитывающей влияние силы плавучести, уравнения теплообмена и переноса примеси. Результаты расчетов показали, что при скорости ветра 1 м/с нагрев наветренной образующей уличного каньона (температура стенки больше на 20°) приводит к изменению структуры течения и характера распространения примеси внутри каньона. Нагрев половины наветренной стенки уличного каньона приводит к изменению структуры течения и значительному увеличению максимальной концентрации примеси в каньоне и средней концентрации в зоне дыхания пешеходов.

Таким образом, проведенный обзор литературы показывает, что при численном моделировании движения воздуха и переноса примеси в уличном каньоне целесообразно наряду с осредненными по Рейнольдсу трехмерными уравнениями Навье–Стокса с динамическим турбулентным замыканием и учетом силы плавучести учитывать сопряженный теплообмен между окружающей средой, стенами зданий и дорожным полотном. По проведенному обзору литературы можно заключить, что влияние температурной неоднородности на ограничивающих рассматриваемую область поверхностях на структуру турбулентного течения – существенно. Исходя из этого, возникает потребность в более полном моделировании конвективного теплопереноса, а это напрямую связано с моделированием влияния солнечного излучения. Такой подход позволит более точно описать сопряженные аэродинамические и тепловые процессы, протекающие в уличных каньонах при солнечном нагреве.

Целями работы являются:

1) разработка физико-математической модели турбулентного неизоэтермического течения с плавучестью, сопряженного радиационно-конвективного теплообмена и переноса легкой инертной примеси в уличном каньоне;

2) численное исследование совместного влияния слабого ветра и частичного / полного солнечного нагрева наветренной стороны уличного каньона, в нижней части которого поступает примесь от выбросов автомобильного транспорта, на качество воздуха в зоне дыхания пешеходов.

Физическая постановка задачи

Рассматривается стационарное неизоэтермическое турбулентное течение несжимаемой вязкой среды в уличном каньоне, образованном двумя протяженными зданиями, между которыми находится широкая дорога. Ось Ox_1 ориентирована на восток, Ox_2 – на север, Ox_3 – вертикально вверх (рис.1). Движение набегающего воздушного потока над зданиями направлено вдоль оси Ox_1 . Теплофизические свойства, степень черноты стен, крыш зданий и дорожного полотна могут различаться. Высота зданий (H) соизмерима с шириной улицы (W). Длина уличного каньона L на порядок превышает высоту и ширину.

В результате солнечного излучения в светлое время суток различные участки образующих уличного каньона в рассматриваемых условиях могут последовательно нагреваться: сначала подветренная сторона, потом дно и наветренная сторона каньона.

Стены и дно уличного каньона могут иметь переменную температуру, отличную от температуры окружающей среды. Это возможно в результате антропогенной деятельности или солнечного нагрева. Для представления влияния силы плавучести в уравнениях движения используется приближение Буссинеска–Обербека, применение которого оправдано при небольшом изменении температуры воздуха внутри рассматриваемой области, порядка несколько градусов. Внизу уличного каньона, ближе к середине, находятся линейные источники выбросов автотранспорта, расположенные на небольшой высоте над поверхностью и ориентированные параллельно уличным зданиям. Поступающая от автомобилей примесь считается легкой, химически инертной и не осаждающейся на образующих уличного каньона.

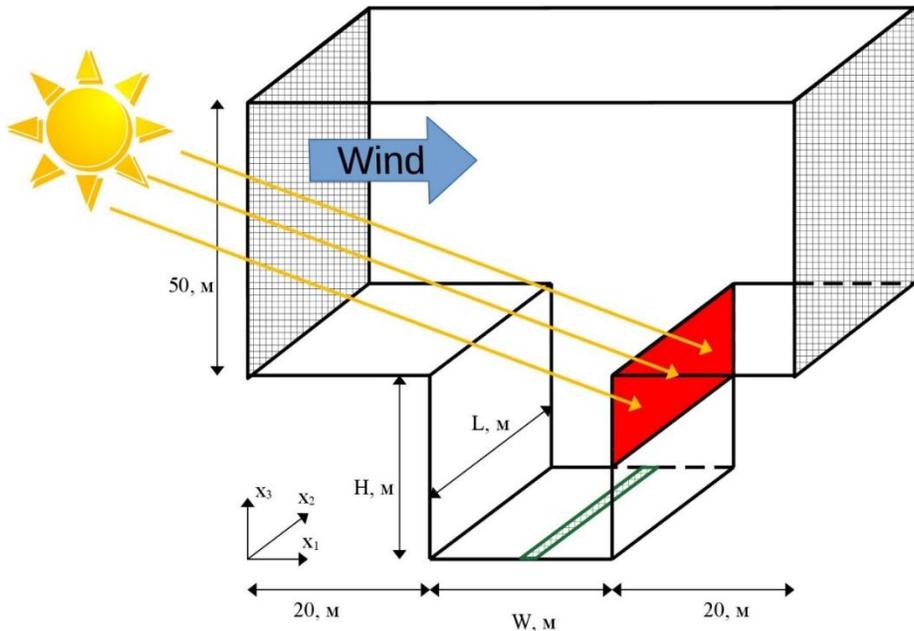


Рис. 1. Иллюстрация физической постановки задачи
 Fig. 1. Illustration of the physical problem formulation

Таблица 1

Свойства ограничивающих каньон поверхностей

Поверхности	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Степень черноты	Толщина, м	Температура на внешней границе, С
Стены	1,5	0,88	1,0	23
Дорога	2,0	0,75	2,0	17
Крыши	2,0	0,88	1,0	23

Геометрические размеры каньона заданы следующим образом: высота H и ширина $W = 20$ м, глубина $L = 90$ м. Скорость ветра выбранного западного направления над зданиями U_1 равна 1,0 м/с. Интенсивность турбулентности потока составляет 30%. Температура окружающей среды принята равной 20°C. Значения коэффициента теплопроводности, степени черноты стен, дороги и крыши, толщины стен, прогреваемого слоя дороги [2–4] представлены в табл. 1. Там же представлены значения температуры на внешних границах: в помещениях здания (23°C), на глубине 2 м под дорожным полотном (17°C).

Математическая постановка задачи

Рассматриваются трехмерные уравнения Рейнольдса для несжимаемой среды ($\rho = \text{const}$), уравнение энергии и переноса инертной газообразной примеси:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0; \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + v_t) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{g_i (\bar{T} - T_0)}{T_0}; i = 1, 2, 3; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{T} \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(a + \frac{v_t}{Pr} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{C} \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(D + \frac{v_t}{Sc} \right) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right) + S_C. \quad (4)$$

В правых и левых частях уравнений (1)–(4) по повторяющемуся индексу j производится суммирование от 1 до 3; черта представляет собой операцию осреднения по Рейнольдсу; $\bar{u}_i, \bar{p}, \bar{T}, \bar{C}$ – компоненты скорости, давление, температура и концентрация инертной газообразной примеси; v, ρ, a, D – кинематическая вязкость, плотность, температуропроводность, коэффициент диффузии; компоненты вектора ускорения свободного падения определяются в соответствии с принятым направлением осей: $g_1 = g_2 = 0, g_3 = -g$; g – значение ускорения свободного падения; v_t, Pr, Sc – турбулентная вязкость, турбулентные числа Прандтля и Шмидта, которые появляются в (1)–(4) в результате турбулентного замыкания с использованием градиентных соотношений Буссинеска [7]; T_0 – некоторая относительная температура, в качестве которой может быть принята температура набегающего потока; S_C – источник поступления примеси вблизи дна уличного каньона.

В качестве граничных условий используются следующие [8–10]. Скорость потока, температура, концентрация примеси, турбулентные характеристики на входе при $x_1 = 0$ известны. На выходе принимаются условия равенства нулю производных по x_1 от величин, вычисляемых из дифференциальных конвективно-диффузионных уравнений (1)–(4) (компонент скорости, температуры, концентрации), что моделирует доминирование адвекции выходящего потока над диффузией. При $x_2 = 0$ или $x_2 = L$ также рассматриваются условия равенства нулю производных по x_2 . На стенках все компоненты скорости равны нулю, и задаются условия отсутствия осаждения примеси, а также условия теплового баланса радиационно-конвективного сопряженного теплообмена, учитывающие изменение температуры не только в воздушной среде, но и в стенах зданий:

$$\alpha (\bar{T} - T_w) + q_{sun} + \frac{\varepsilon_w}{2(2 - \varepsilon_w)} [H_w - 4\sigma T_w^4] = \frac{\lambda_w}{L_w} (T_w - T_{room}). \quad (5)$$

Здесь T_w – температура наружной поверхности стен или дна каньона; q_{sun} – тепловой поток от солнечного нагрева, для некоторых участков стен или дна может быть равен нулю из-за затененности поверхности; ε_w – степень черноты поверхности каньона; H_w – плотность падающего излучения ($H_w = 1\ 672$ Вт/м² принята для рассматриваемых условий); σ – постоянная Стефана–Больцмана; λ_w, L_w – коэффициент теплопроводности и толщина стен зданий; T_{room} – температура внутри помещений, которая поддерживается на постоянном уровне; α – коэффициент теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается с применением формул метода пристеночных функций [11]

$$\alpha = \frac{\rho C_p C_\mu^{0.25} \sqrt{k_p}}{Pr \ln \left(E y_p C_\mu^{0.25} \sqrt{k_p} / \nu \right) / \kappa + f(Pr / Pr_\tau)},$$

где k_p – кинетическая энергия турбулентности на расстоянии y_p от стенки в области турбулентного пристенного слоя, $E = 9.0$, C_p – удельная теплоемкость.

При расчете $q_{sun} = Q_{sun}(1 - A)$ использовались формулы из [12]

$$Q_{sun} = \begin{cases} (a_g - a_w) S_{slope} S_0 \cos \chi, & \cos \chi > 0 \\ 0, & \cos \chi \leq 0 \end{cases},$$

где $a_g(x_3)$, $a_w(x_3)$ – функции, учитывающие рассеяние и поглощение излучения кислородом, озоном, диоксидом углерода и водяным паром в атмосфере [12], χ – угол склонения Солнца, $S_{slope} = \cos i / \cos \chi$, i – угол падения солнечных лучей на поверхность, $\cos i = \cos \alpha_0 \cos \chi + \sin \alpha_0 \sin \chi \cos(\beta - \eta)$, α_0 – угол наклона поверхности ($\alpha_0 = \pi/2$ или $3\pi/2$ – вертикальные поверхности, ориентированные на запад или восток), β – солнечный азимут, η – азимут наклона поверхности, который измеряется как угол между нормалью к поверхности и направлением на юг, S_0 – солнечная постоянная; A – альbedo поверхности.

В данной работе турбулентное замыкание основных уравнений осуществляется с использованием k - ε -модели [13, 14], в которой рассматривается воздействие силы плавучести на уровень турбулентных пульсаций. Подход Лаундера–Сполдинга [11] применяется для эффективного и экономичного описания турбулентных процессов в непосредственной близости от стенки. Метод пристеночных функций Лаундера–Сполдинга широко используется при моделировании турбулентности неизотермических течений вблизи стенки при высоких значениях числа Рейнольдса (более 10^6), которые часто реализуются в промышленных и геофизических приложениях. Главным образом это обусловлено разумными вычислительными затратами на проведение численного моделирования трехмерных течений и теплообмена в геометрически сложных областях.

$$\frac{\partial k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P + G - \varepsilon; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (P + C_{\varepsilon 3} G) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (7)$$

$$v_T = C_\mu k^2 / \varepsilon; C_\mu = 0.09; Pr_t = 0.9; Sc_t = 0.5; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.22;$$

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

$$P = v_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}; \quad G = \delta_{i3} \frac{g_i}{T_0} \frac{v_t}{Pr_t} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i}.$$

Численный метод решения задачи

Поставленная задача решается численно с использованием структурированных сеток и метода конечного объема [15]. В параллелепипеде, включающем область исследования, строится неравномерная прямоугольная сетка со сгущением сеточных плоскостей к твердым поверхностям (стенкам или крышам уличного каньона). Часть полученных в результате построения такой сетки конечных объемов является фиктивной, поскольку они выходят за область моделирования движения и теплообмена несущей среды. Они исключаются из расчетов. Сгущение узлов сетки

вблизи твердых поверхностей необходимо для обеспечения выполнения условий применения метода пристеночных функций [11], согласно которому ближайший к твердой поверхности узел сетки должен располагаться на безразмерном расстоянии $y^+ = yv^*/\nu = 50-300$, в области развитой пристеночной турбулентности. Здесь y – расстояние до стенки, v^* – динамическая скорость, ν – коэффициент кинематической вязкости несущей среды. После построения вычислительной сетки производится получение разностной схемы, аппроксимирующей дифференциальную задачу. В соответствии с основными идеями метода конечного объема это осуществляется путем интегрирования каждого дифференциального уравнения по отдельному конечному объему, при приближенном вычислении поверхностных и объемных интегралов применяются 2D и 3D аналоги метода средних прямоугольников, а для представления производных – центрально-разностные формулы численного дифференцирования. Для точного выполнения разностного уравнения неразрывности (1) используется смешенное представление значений сеточных функций зависимых переменных, в соответствии с которым компоненты вектора скорости ассоциируются с центрами граней конечных объемов, а остальные сеточные функции зависимых переменных – с центрами конечных объемов [15]. Использование таких разнесенных сеток избавляет также от осцилляций рассчитываемых значений давления, которые могут иметь место при использовании неразнесенных сеток.

Кроме того, чтобы уменьшить влияние схемной вязкости на искомые значения скорости, температуры, концентрации, в данной работе применяются так называемые монотонизированные противопотоковые схемы ван Лира MLU или MUSCL [15, 16]. В итоге полученные разностные схемы на участках монотонного изменения приближенного решения на равномерных сетках обладают вторым порядком аппроксимации, соответствующие им системы линейных уравнений имеют матрицы с диагональным преобладанием, что позволяет использовать надежные итерационные методы для получения приближенного решения задачи. В данной работе такие системы решались методом релаксации для компонент скорости и методом неполной факторизации Н.И. Булеева [17] для остальных скалярных характеристик (температуры, концентрации, турбулентных параметров). Поскольку полная задача является взаимосвязанной и нелинейной, использовались глобальные итерации. В качестве критерия завершения вычислительного процесса рассматривались значения норм векторов невязок сеточных уравнений и векторов ошибок между двумя последовательными итерациями. Предлагаемая модель и численный метод прошли тестирование на результатах экспериментов в ветровом тоннеле с обогреваемой выемкой [18] и переноса примеси в модели уличного каньона [19]. Получено хорошее согласование [6].

Отдельно остановимся на выводе вычислительной процедуры, позволяющей избежать применения локальных итераций для получения значения температуры стенки T_w из нелинейного уравнения (5). Представим (5) в следующем виде:

$$Ax^4 + Dx + E = 0,$$

где

$$x = T_w / 300, \quad A = \varepsilon_w 4\sigma \cdot 300^4 / 2(2 - \varepsilon_w), \quad D = (\alpha + \lambda_k / L_k) \cdot 300, \\ E = -\alpha T_p - q_{sun} - \varepsilon_w / (2(2 - \varepsilon_w)) H_w - \lambda_k T_{room} / L_k.$$

Перепишем это уравнение в виде:

$$x^4 + dx + e = 0, \quad d = D/A > 0, \quad e = E/A < 0,$$

и для нахождения положительного действительного корня применим метод Феррари [20]. Этот корень вычисляется по следующим формулам:

$$x = \frac{Tw}{300} = 0.5(-\sqrt{-y_1} + \sqrt{-y_1 - 4q}), \quad (8)$$

где $y_1 = \sqrt[3]{-\frac{d^2}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{d^2}{2} - \sqrt{Q}}$, $Q = \left(\frac{-4e}{3}\right)^3 + \left(\frac{d^2}{2}\right)^2$, а при выборе величины $q = \frac{1}{2}(-y_1 \pm \sqrt{y_1^2 - 4e})$ следует ориентироваться на то значение q , которое обеспечивает неотрицательность $(-y_1 - 4q)$ в (8).

Результаты расчетов

Для обнаружения неблагоприятных аэродинамических условий, приводящих к увеличению концентрации примеси в зоне дыхания пешеходов, были проведены расчеты (табл. 2) для изотермического случая (базовый вариант 1), частичного (вариант 2) и полного солнечного нагрева наветренной стороны уличного каньона (вариант 3). В работах [2–6] указывается, что при совместном влиянии слабого набегающего ветрового потока над каньоном (скорость ~ 1 м/с) и существенной естественной конвекции у наветренной поверхности может образовываться сложная аэродинамическая картина потока внутри уличного каньона, приводящая к накоплению примеси в нижней части каньона.

Таблица 2

Параметры для расчета теплообмена в уличном каньоне при солнечном нагреве для рассматриваемых вариантов расчетов

№ варианта	t , время суток	q_{sun} , Вт/м ²	A_{sun}
1		0	0
2	18:00	780	0.5
3	15:00	600	1.0

Примечание. t – локальное время суток, q_{sun} – величина теплового потока падающего солнечного излучения, зависящая от величины угла склонения χ , A_{sun} – доля поверхности наветренной стенки, на которую падает солнечное излучение.

В расчетах использовалась сетка $102 \times 63 \times 92$. Удвоение количества узлов сетки в каждом координатном направлении не привело к существенному изменению значений скорости и концентрации примеси.

При рассмотрении неизотермических течений в атмосферном пограничном слое обычно используется число Ричардсона $Ri = gH\Delta T_{w,ave} / (T_{ref}U_{ref}^2)$, чтобы количественно оценить баланс между силой термической плавучести $g\Delta T_{w,ave} / T_{ref}$ и адвекции U_{ref}^2 / H . В городских условиях неизотермические течения можно классифицировать на три категории [3]: $Ri \ll 1$ – адвекция существенно доминирует над силой термической плавучести; $Ri \sim 1$ – адвекция сопоставима с силой плавучести; $Ri \gg 1$ – силы плавучести определяют характер течения. Осредненная по всем поверхностям уличного каньона разность $T_w - T_{ref}$ в рассматриваемых условиях

составила 4.03 К (вариант 2) и 6.13 К (вариант 3) и, соответственно, $Ri = 0$ (вариант 1), $Ri = 2.7$ (вариант 2), $Ri = 4.1$ (вариант 3) ($H = 20$ м, $U_{ref} = 1$ м/с, $T_{ref} = 293$ К). Таким образом, вариант 1 относится к случаю, когда распределение примеси в каньоне определяется адвективным переносом, а варианты 2 и 3 – к сложному взаимодействию адвекции и плавучести и их влиянию на распространение примеси.

На рис. 2 представлены векторное поле скорости и распределение безразмерной концентрации $C^* = c^* U_1^* L^* H / S_C$ в поперечном сечении уличного каньона при $x_2 = L/2$ для варианта 1 (изотермический случай). Видно, что в каньоне формируется вращательное движение воздуха с активным выносом поступающей снизу примеси за счет адвекции. Наибольшие значения концентрации примеси наблюдаются в левой половине нижней части области исследования и у подветренной стороны.

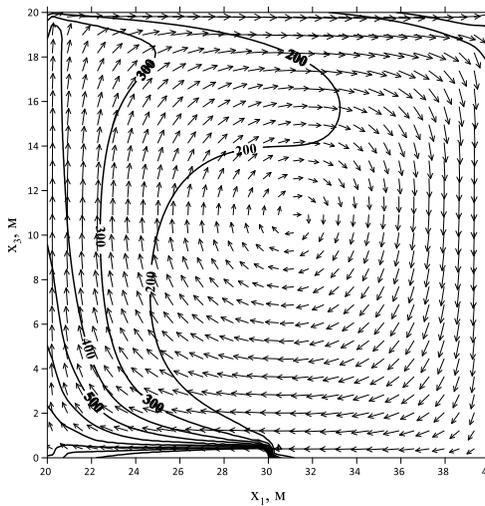


Рис. 2. Рассчитанные для варианта 1 векторное поле скорости и изолинии безразмерной концентрации примеси внутри уличного каньона при $x_2 = L/2$

Fig. 2. Calculated vector velocity field and pollution concentration contours within the street canyon at $x_2 = L/2$ for case 1

Рисунки 3 и 4 демонстрируют как нагреваемая Солнцем величина доли поверхности A_{sun} наветренной стены и значение теплового потока q_{sun} влияют на аэродинамику и тепломассоперенос в уличном каньоне. При $A_{sun} = 0.5$ и $q_{sun} = 780$ Вт/м² (см. рис. 3, а, 4, а) основной вихрь смещается влево и вверх, а в нижней части каньона интенсивность движения уменьшается, вдоль наветренной стенки расчеты показывают подъемное движение, которое формирует многовихревую структуру; в частности, внизу у подветренной стороны появляется вихрь, препятствующий выносу примеси вверх вдоль этой поверхности. Заметим, что чем больше поверхность солнечного нагрева наветренной стороны (см. рис. 3, б, 4, б), тем больше скорость локального пристенного подъемного движения и скорость движения воздуха на уровне зоны дыхания пешеходов. Судя по рис. 2–4, наибольшие значения скорости на этом уровне имеет при изотермических условиях, наименьшие – при $A_{sun} = 0.5$, что согласуется с результатами [3].

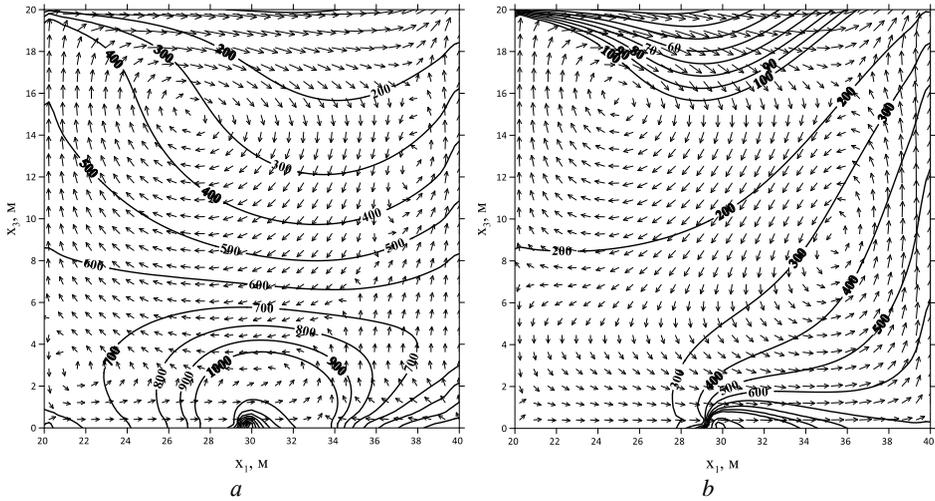


Рис. 3. Рассчитанные векторные поля скорости и изолинии безразмерной концентрации примеси внутри уличного каньона при $x_2 = L/2$: *a* – вариант 2, *b* – вариант 3
Fig. 3. Calculated vector velocity fields and pollution concentration contours within the street canyon at $x_2 = L/2$: (*a*) case 2 and (*b*) case 3

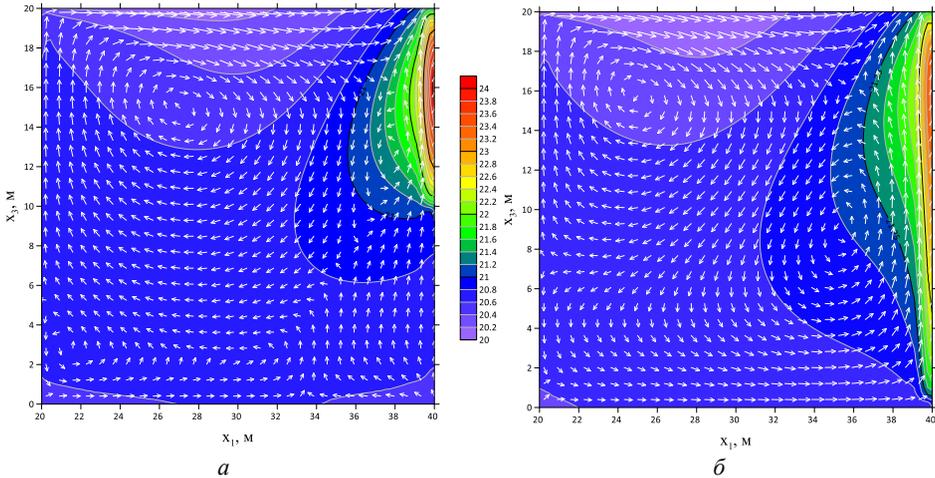


Рис. 4. Рассчитанные векторные поля скорости и изолинии температуры воздуха внутри уличного каньона при $x_2 = L/2$: *a* – вариант 2, *б* – вариант 3
Fig. 4. Calculated vector velocity fields and air temperature contours within the street canyon at $x_2 = L/2$: (*a*) case 2 and (*b*) case 3

В итоге для варианта 2, судя по изолиниям концентрации, ниже 8 м в уличном каньоне формируется слой загрязненного воздуха с почти постоянной концентрацией, значения которой изменяются в сторону повышения только вблизи источника поступления примеси. Концентрация в зоне дыхания пешеходов на высоте 1,6 м для этого варианта значительно увеличивается по сравнению со случаем изотермического течения (Рис 5). При $A_{sun} = 1.0$ и $q_{sun} = 600 \text{ Вт/м}^2$ (см. рис. 3, *b*, 4, *b*)

образуется двухвихревая картина течения: ярко выраженный вихрь сверху способствует возвращению части выносимой из каньона примеси в его верхнюю часть, а второй, справа снизу, – выносу поступающей из линейного источника примеси вдоль наветренной стенки из каньона.

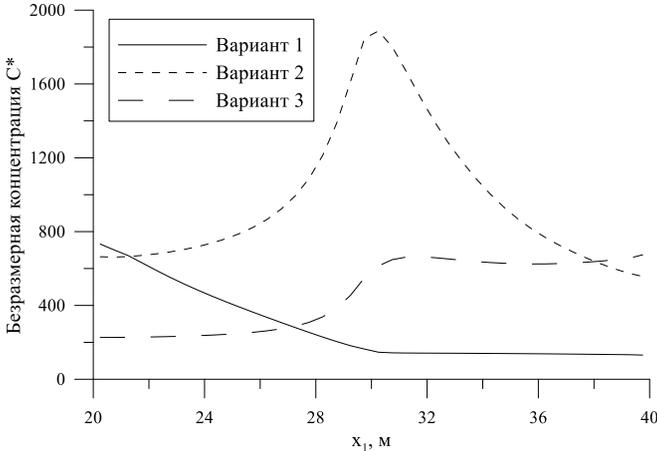


Рис. 5. Значения безразмерной концентрации примеси на высоте 1.6 м от нижней границы уличного каньона

Fig. 5. Dimensionless pollution concentration at a height of 1.6 m from the lower boundary of the street canyon

Такая картина течения способствует очищению (хорошему выносу примеси) из левой нижней части каньона, что подтверждает график зависимости безразмерной концентрации $C^* = c^* U_1^* L^* H / S_C$ от x_1 (рис. 5).

Заключение

Разработана версия модели M2UE для расчета турбулентного неизотермического течения с плавучестью и сопряженным теплообменом с твердыми стенками, ограничивающими область уличного каньона. На поверхностях уличного каньона могут рассматриваться условия не только конвективного, но и радиационного теплообмена (охлаждения / нагрева) с окружающей средой.

Для рассматриваемых в работе условий радиационно-конвективного сопряженного теплообмена на твердых стенках разработан эффективный безитерационный метод расчета температуры поверхности.

Выполненные на основе усовершенствованной модели M2UE вычислительные эксперименты показали, что при неполном солнечном нагреве наветренной стенки уличного каньона и слабом ветре (~ 1 м/с) внутри рассматриваемой области может сформироваться аэродинамическая картина, приводящая к накоплению ($2x$) примеси в нижней половине каньона и особенно в зоне дыхания пешеходов.

Список источников

1. 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. doi: 10.17223/9785751123963

2. *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. 190. Art. 107525. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107525
3. *Yang H., Chen G., Wang D., Hang J., Li Q., Wang Q.* Influences of street aspect ratios and realistic solar heating on convective heat transfer and ventilation in full-scale 2D street canyons // *Building and Environment*. 2021. V. 204. Art. 108125. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108125
4. *Liu S., Yang X., Yang H., Gao P., Hang J., Wang Q.* Numerical investigation of solar impacts on canyon vortices and its dynamical generation mechanism // *Urban Climate*. 2021. V. 39. Art. 100978. doi: 10.1016/j.uclim.2021.100978
5. *Bottillo S., De Lieto Vollaro A., Galli G., Vallati A.* CFD modeling of the impact of solar radiation in a tridimensional urban canyon at different wind conditions // *Solar Energy*. 2014. V. 102. P. 212–222. doi: 10.1016/j.solener.2014.01.029
6. *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
7. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 846 с.
8. *Бубенчиков А.М., Старченко А.В.* Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. 236 с.
9. *Литвинцев К.Ю., Дектерев А.А., Мешикова В.Д., Филимонов С.А.* Влияние излучения на формирование ветрового и температурного режимов в городской среде // *Теплофизика и аэромеханика*. 2023. № 4. С. 723–735.
10. *Белов И.А., Шеленикевич И.А., Шуб Л.И.* Моделирование гидромеханических процессов в технологии изготовления полупроводниковых приборов и микросхем. Л.: Политехника, 1991. 287с.
11. *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
12. *Mahrer Y., Pielke R.A.* The Effects of Topography on Sea and Land Breezes in Two-Dimensional Numerical Model // *Monthly Weather Review*. 1977. V. 105. P. 1151–1162.
13. *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. P. 1543–1557.
14. *Starchenko A.V., Danilkin E.A., Leshchinskiy D.V.* Numerical Simulation of the Distribution of Vehicle Emissions in a Street Canyon // *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2023. V. 15 (3). С. 427–435.
15. *Patankar S.* Numerical heat transfer and fluid flow. New York: Hemisphere Publ. Corporation, 1980. 214 p. doi: 10.1201/9781482234213
16. *Van Leer B.* Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to Godunov's method // *Journal of Computational Physics*. 1979. V. 32 (1). P. 101–136. doi: 10.1016/0021-9991(74)90019-9
17. *Ильин В.П.* Методы неполной факторизации для решения алгебраических систем. М.: Физматлит, 1995. 288 с.
18. *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
19. *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
20. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 831с.

References

1. Starchenko A.V., Nuterman R.B., Danilkin E.A. (2015) *Chislennoe modelirovanie turbulentnykh techeniy i perenosa primesi v ulichnykh kan'onakh* [Numerical study of turbulent flows and pollution transport in street canyons]. Tomsk: Tomsk State University Press. doi: 10.17223/9785751123963
2. 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 107525. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107525
3. Yang H., Chen G., Wang D., Hang J., Li Q., Wang Q. (2021) Influences of street aspect ratios and realistic solar heating on convective heat transfer and ventilation in full-scale 2D street canyons. *Building and Environment*. 204. Article 108125. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108125
4. Liu S., Yang X., Yang H., Gao P., Hang J., Wang Q. (2021) Numerical investigation of solar impacts on canyon vortices and its dynamical generation mechanism. *Urban Climate*. 39. Article 100978. doi: 10.1016/j.uclim.2021.100978
5. Bottillo S., De Lieto Vollaro A., Galli G., Vallati A. (2014) CFD modeling of the impact of solar radiation in a tridimensional urban canyon at different wind conditions. *Solar Energy*. 102. pp. 212–222. doi: 10.1016/j.solener.2014.01.029
6. Danilkin E.A., Leshchinskiy D.V., Starchenko A.V. (2023) Mikromasshtabnaya matematicheskaya model' neizotermicheskogo turbulentnogo techeniya i perenosa passivnoy gazoobraznoy primesi v ulichnom kan'one [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
7. Loytsyanskiy L.G. (2003) *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Gas and fluid mechanics]. Moscow: Drofa.
8. Bubenchikov A.M., Starchenko A.V. (1998) *Chislennyye modeli dinamiki i goreniya aerodispersnykh smesey v kanalakh* [Numerical models of dynamics and combustion of aerodispersed mixtures in channels]. Tomsk: Tomsk University Publishing House.
9. Litvintsev K.Yu., Dekterev A.A., Meshkova V.D., Filimonov S.A. (2023) Vliyaniye izlucheniya na formirovaniye vetrovogo i temperaturnogo rezhimov v gorodskoy srede [Influence of radiation on the formation of wind and temperature regimes in the urban environment]. *Teplofizika i aeromekhanika – Thermophysics and Aeromechanics*. 4. pp. 723–735.
10. Belov I.A., Shelenshkevich I.A., Shub L.I. (1991) *Modelirovanie gidromekhanicheskikh protsessov v tekhnologii izgotovleniya poluprovodnikovyykh priborov i mikroskhem* [Modeling of hydro-mechanical processes in the technology of semiconductor devices and circuits production]. Leningrad: Politekhnika.
11. 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
12. Mahrer Y., Pielke R.A. (1977) The effects of topography on sea and land breezes in two-dimensional numerical model. *Monthly Weather Review*. 105. pp. 1151–1162. doi: 10.1175/1520-0493(1977)105<1151:TEOTOS>2.0.CO;2
13. 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
14. 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(3). pp. 427–435. doi: 10.1134/S207004822303016X
15. Patankar S. (1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere Publishing Corporation. doi: 10.1201/9781482234213

16. 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
17. И'ин В.П. (1995) *Методы неполной факторизации для решения алгебраических систем* [Methods of incomplete factorization for solving algebraic systems]. Moscow: Fizmatlit.
18. 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
19. 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
20. Korn G., Korn T. (1984) *Справочник по математике для научных работников и инженеров* [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow: Nauka.

Сведения об авторах:

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

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

Information about the authors:

Starchenko Aleksandr V. (Professor, Doctor of Physics and Mathematics, Head of Department, Department of Computational Mathematics and Computer Modeling, Leading Researcher, Regional Scientific and Educational Mathematical Center, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: starch@math.tsu.ru

Danilkin Evgeniy A. (Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Computational Mathematics and Computer Modeling, Senior Researcher, Regional Scientific and Educational Mathematical Center, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ugin@math.tsu.ru

Leshchinskiy Dmitriy V. (Senior Lecturer, Department of Computational Mathematics and Computer Modeling, Junior Researcher, Regional Scientific and Educational Mathematical Center, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: 360flip182@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17.06.2025; принята к публикации 08.12.2025

The article was submitted 17.06.2025; accepted for publication 08.12.2025