



РЕГИОНАЛЬНЫЙ
НАУЧНО-
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ
МАТЕМАТИЧЕСКИЙ
ЦЕНТР



Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ НЕСИММЕТРИЧНОГО УЛИЧНОГО КАНЬОНА НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ И КОНЦЕНТРАЦИЮ ПРИМЕСИ*

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования
РФ (соглашение № 075-02-2021-1392)

Е.А. Данилкин, А.В. Старченко,
Е.А. Каратаева, И.В. Дель, К.В. Юмин, Н.С. Смиян, Д.В. Лещинский
Региональный научно-образовательный математический центр
Томского государственного университета

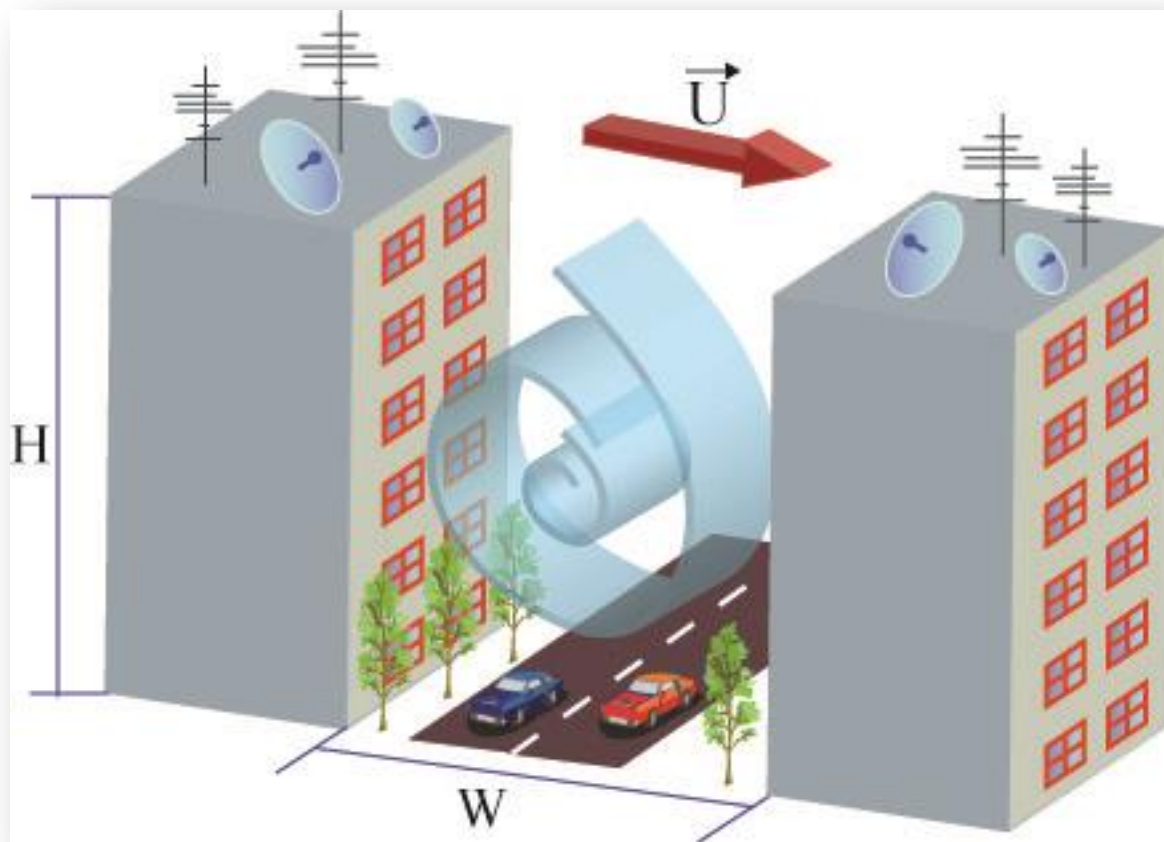
**Вторая конференция Математических центров России
(7–11 ноября 2022 г., МГУ, МИАН, г. Москва)**

Введение

Уличный каньон представляет собой протяженный участок улицы с параллельно расположенными высокими зданиями с обеих сторон этого участка улицы. Уличный каньон является базовым элементом архитектуры современного города и поэтому он выступает в качестве объекта экологических исследований, посвященных, как изучению распространения и рассеивания вредных выбросов в городских кварталах, так и микроклимата города в целом.



Введение



В качестве важных параметров, влияющих на структуру течения и механизм распространя примеси, можно выделить метеоусловия (скорость и направления ветра), геометрические характеристики (соотношение сторон уличного каньона, форма крыши), влияние растительности шумозащитных барьеров.

Введение



В настоящее время в крупных городах на долю автотранспорта приходится до 70 % вредных выбросов в атмосферу. У автотранспорта, как источника вредных выбросов, есть несколько выделяющих его особенностей. Это низкое расположение источника выбросов и распределенность по всей территории города.

Поэтому важным является разработка средств оценки и прогноза качества атмосферного воздуха на наиболее загруженных транспортом улицах города. Одним из эффективных способов исследования процессов распространения выбросов автотранспорта является применение микромасштабных математических моделей, описывающих движение воздуха и перенос примеси.

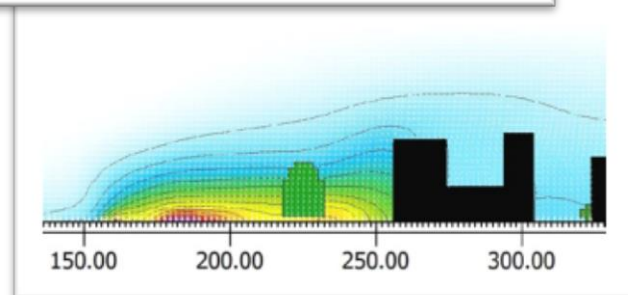
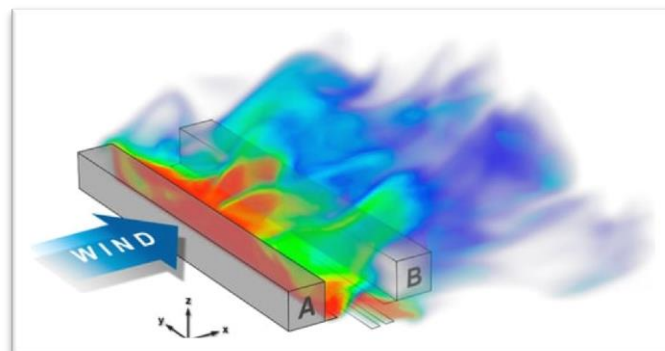
Целью работы является применение микромасштабной математической модели M2U для исследования турбулентных течений и переноса пассивной газообразной примеси в несимметричных уличных каньонах.

Введение

В настоящее время для решения проблем охраны окружающей среды наряду с приборным контролем состава атмосферного воздуха активно применяются методы математического моделирования, которые позволяют численно предсказывать детальную картину распределения концентраций газовых составляющих, загрязняющих атмосферный воздух.

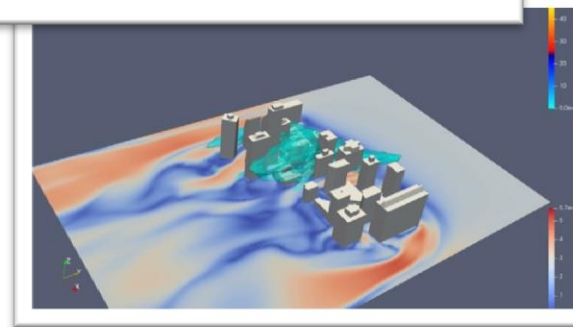
Коммерческие пакеты:

OpenFOAM, FLUENT, STAR-CD, PHOENICS



FlowVision

ENVI
_MET



Моделирование турбулентности

Математическая постановка задачи

Турбулентное движение несжимаемой жидкости описывается уравнениями Навье-Стокса, а тепло-, массообмен уравнением адвекции-диффузии:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}; \quad (2)$$

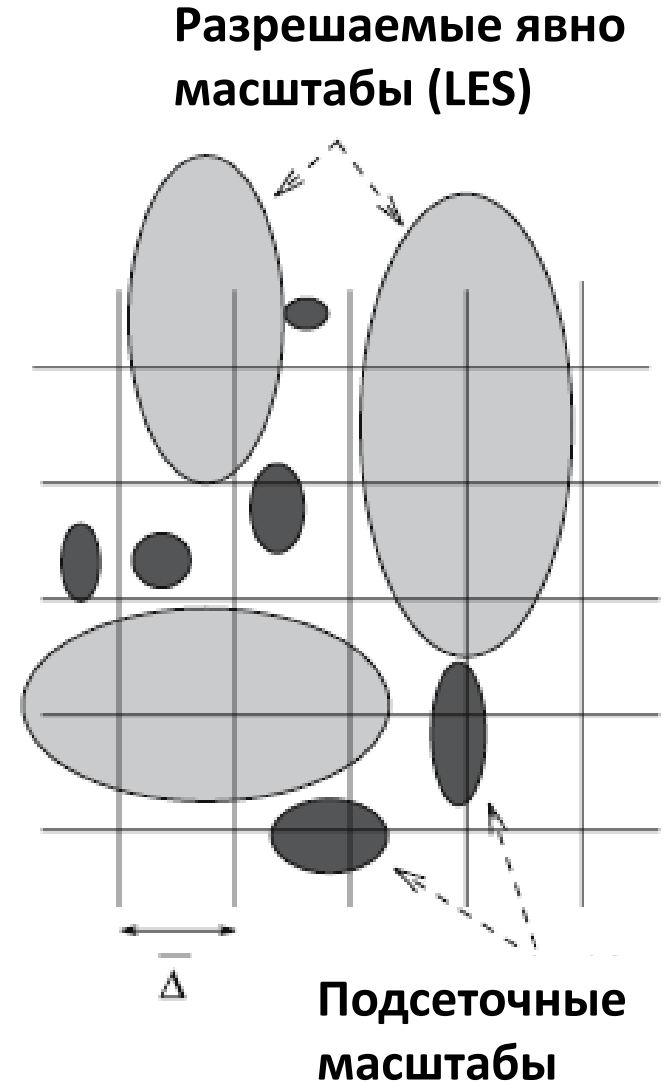
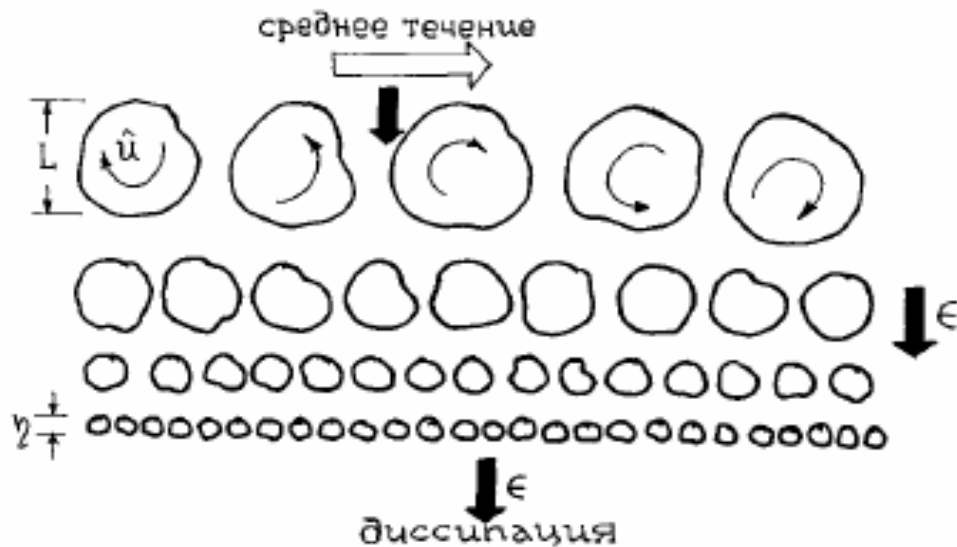
$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u_j C}{\partial x_j} = \alpha_c \frac{\partial^2 C}{\partial x_j \partial x_j} + S; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u_j T}{\partial x_j} = \alpha_T \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j}; \quad (4)$$

где u_i – компоненты мгновенного поля скорости, ν – коэффициент кинематической вязкости, P – давление, C – концентрация примеси, T – температура, S – функция распределения источников, α_c – коэффициент диффузии, α_T – коэффициент температуропроводности, ρ – плотность.

Моделирование турбулентных течений

- **DNS**, прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation)
- **LES**, моделирование крупных вихрей (Large Eddy Simulation)
- **RANS**, базируется на осреднённых по времени уравнениях Навье-Стокса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)



RANS - Модель

Математическая постановка задачи

Математическая модель включает в себя осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, неразрывности, переноса примеси и теплообмена:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} &= 0, \\ \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} + g_i \frac{(\bar{T} - T_0)}{T_0}, i = 1, 2, 3, \\ \frac{\partial \bar{T} \bar{u}_j}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \overline{T' u'_j}}{\partial x_j}, \\ \frac{\partial \bar{C} \bar{u}_j}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \overline{C' u'_j}}{\partial x_j} + S.\end{aligned}\tag{1}$$

Здесь, \bar{u}_i , u'_j – осредненные и пульсационные проекции вектора скорости на оси координат; \bar{p} – давление; ρ – плотность; ν – кинематическая вязкость воздуха; \bar{T} – осредненная температура; \bar{C} – осредненное значение концентрации примеси; S – функция, описывающая распределение точечных и линейных источников примеси; $\overline{u'_i u'_j}$ – тензор напряжений Рейнольдса; a , D – температуропроводность и коэффициент диффузии; $g_i(0,0,g)$ – компоненты ускорения свободного падения. По повторяющемуся индексу j производится суммирование от 1 до 3.

Математическая постановка задачи

Замыкание описанной системы уравнений проводится с использованием градиентно-диффузионной гипотезы Буссинеска:

$$\begin{aligned}\overline{u'_i u'_j} &= -\nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \\ \overline{T' u'_j} &= -\frac{\nu_T}{Pr_T} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}, \quad \overline{C' u'_j} = -\frac{\nu_T}{Sc_T} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j}.\end{aligned}\tag{2}$$

Для вычисления турбулентной вязкости используется двухпараметрическая « $k - \varepsilon$ » – модель турбулентности, учитывающая влияние сил плавучести

$$\begin{aligned}\frac{\partial k \bar{u}_j}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P + G - \varepsilon, \\ \frac{\partial \varepsilon \bar{u}_j}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} C_{\varepsilon 1} (P + C_{\varepsilon 3} G) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, \\ \nu_T &= C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad P = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}, \quad G = \beta g_j \frac{\nu_T}{Pr_T} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j},\end{aligned}\tag{3}$$

где ν_T – турбулентная вязкость, k – кинетическая энергия турбулентности, ε – диссипация турбулентной кинетической энергии, β – коэффициент температурного расширения. Коэффициенты модели турбулентности $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.22$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $C_{\varepsilon 3} = \tanh(|u_3|/|u_1|)$, $C_\mu = 0.09$, $Sc_T = 0.5$, $Pr_T = 0.9$.

Граничные условия:

- для задания значений скорости, турбулентных параметров, трения и теплового потока вблизи твердой поверхности используется метод пристеночных функций Лаундера-Сполдинга.
- в модели не учитывается осаждение примеси на стенах, крышах и подстилающей поверхности, поэтому на границах производные от концентрации по нормали к поверхности задаются равными нулю.
- краевые условия на выходе потока из расчетной области и на открытой верхней границе – это равенство нулю производных по нормали.
- при задании граничных условий на входе используются равномерные профили скорости k , ε , \bar{T} , \bar{C} .

При расчете течений вокруг зданий использовался метод фиктивных областей, суть которого заключается в том, что значения векторных и скалярных величин в области преграды равны нулю и на границах фиктивных конечных объемах нет потоков диффузии.

Аппроксимация и численный метод решения

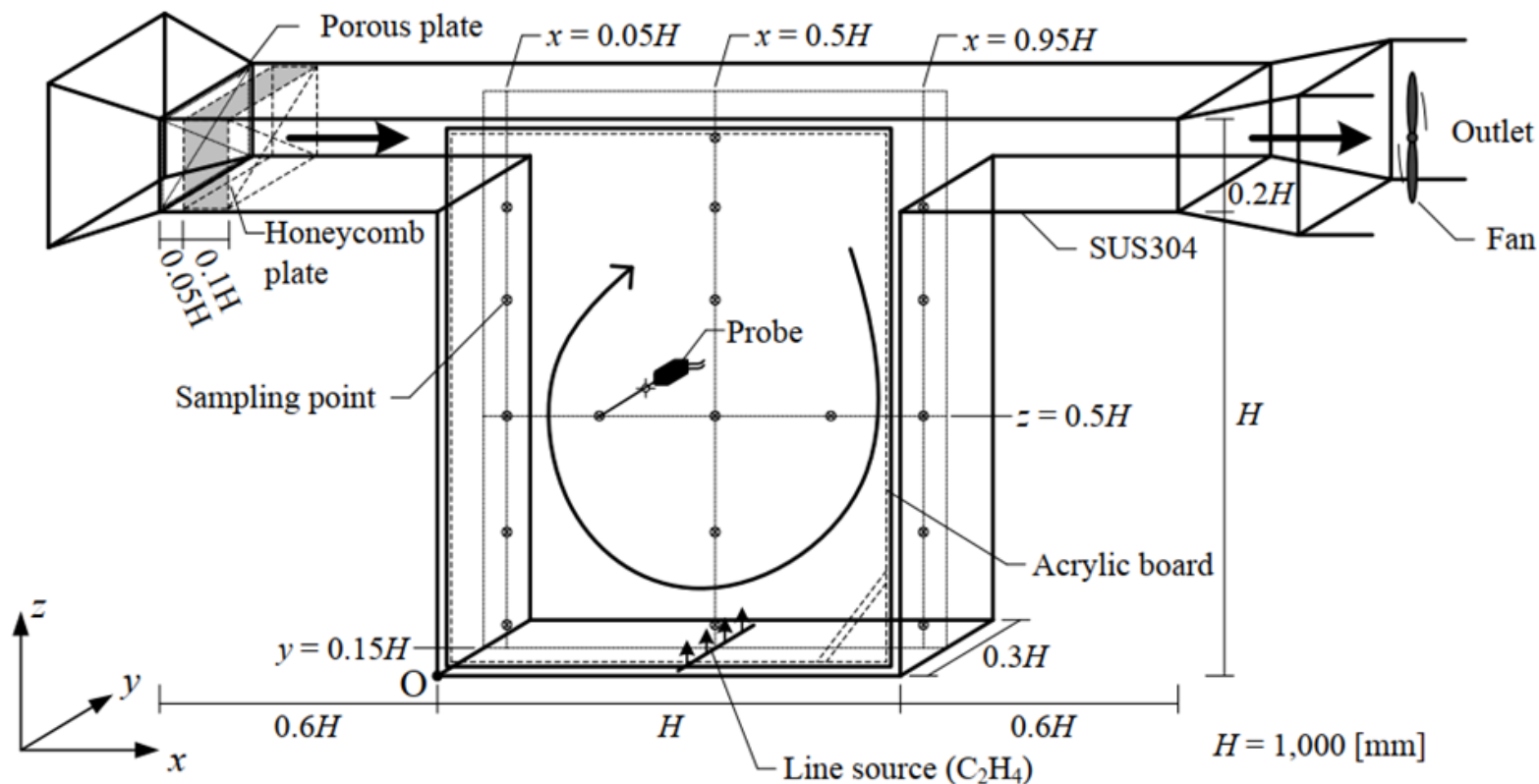
- ✓ Дискретизация дифференциальной задачи выполнена методом конечного объема на структурированной декартовой сетке (разнесенная сетка).
- ✓ Аппроксимация конвективных членов уравнения переноса выполняется с использованием противотоковой схемы MLU Ван Лира.
- ✓ Результатом дискретизации является неявная разностная схема 2-ого порядка аппроксимации по пространству и 1-ого по времени;

Для расчёта поля течения использовалась процедура SIMPLE Патанкара-Сполдинга:

- задание начальных приближений для всех зависимых переменных;
- решение уравнений изменения количества движения для определения предварительных значений скорости;
- решение уравнения Пуассона для поправки давления;
- коррекция поля давления;
- коррекция компонент скорости;
- решение дискретных аналогов для турбулентных характеристик и концентрации;
- принятие полученных значений зависимых переменных в качестве исходных и повторение операций, начиная со второй.

Верификация математической модели

Верификации разработанной модели переноса выполнена на задачи моделирования переноса примеси в уличном каньоне, путем сравнения результатов моделирования с данными натуральных экспериментов [1]



[1] Hideki Kikumoto, Ryoza Ooka. Large-eddy simulation of pollutant dispersion in a cavity at fine grid resolutions // Building and Environment (2018) 127, 127-137.

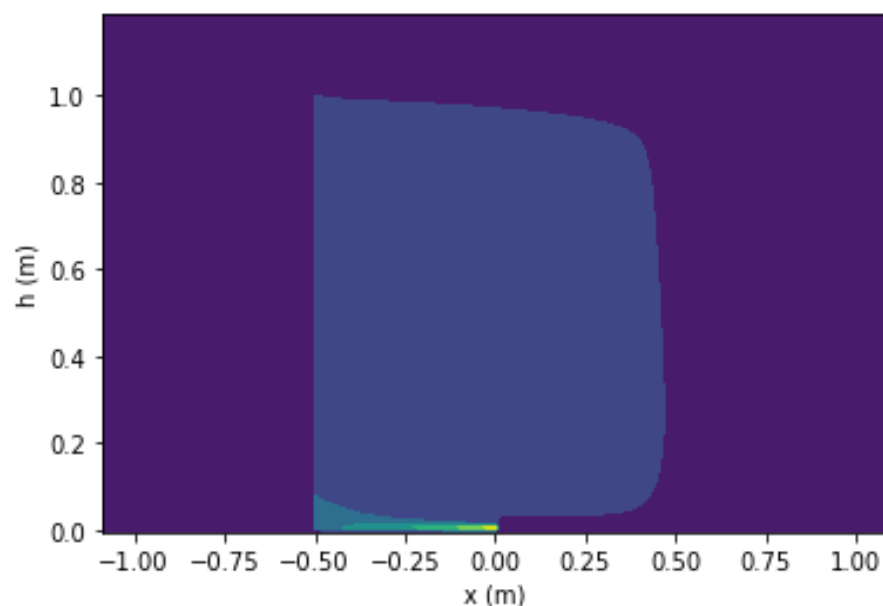
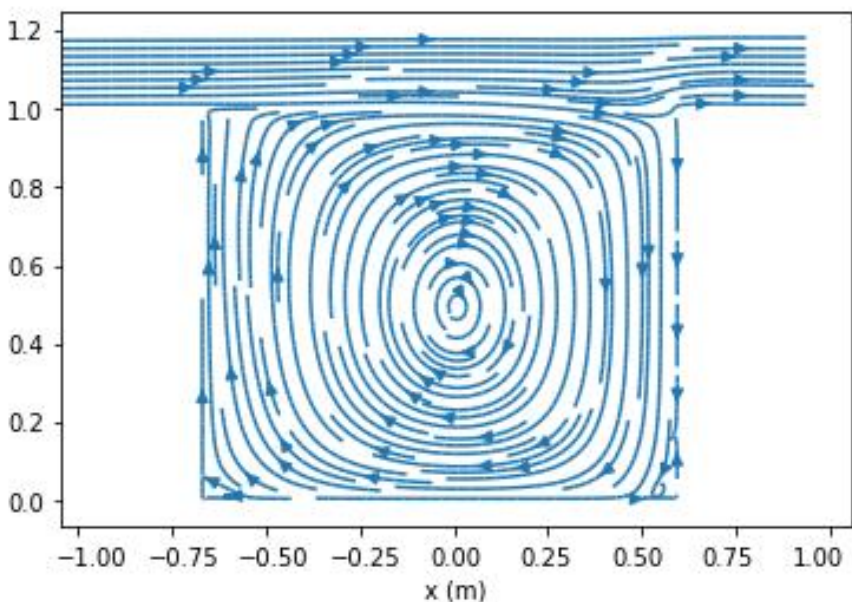
Верификация математической модели

В выбранном эксперименте испытательная камера представляла собой модель уличного каньона. Геометрические размеры каньона заданы следующим образом: высота (H) и ширина (W) 1000 мм, глубина (L) 300 мм.

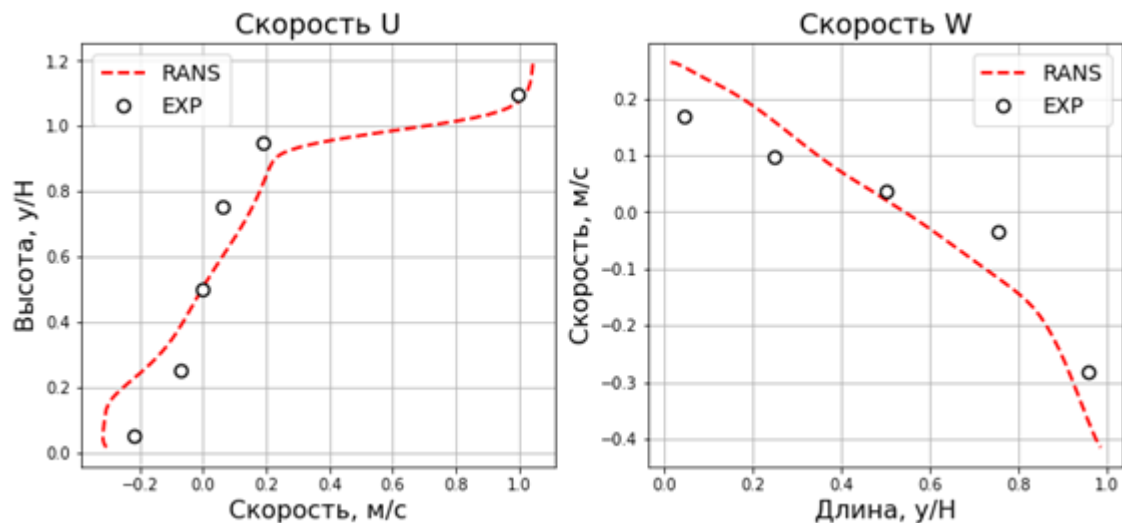
Расчеты проводились на структурированной декартовой сетке $110 \times 62 \times 100$ по осям Ox , Oy и Oz соответственно. Выполнено сгущение сетки в приграничных узлах. Это сделано для попадания безразмерной величины u^+ в рекомендуемый диапазон от 30 до 300.

В результате эксперимента сделаны замеры значений компонент скорости в сечениях $x = 0.5 * H$, $z = 0.5 * W$.

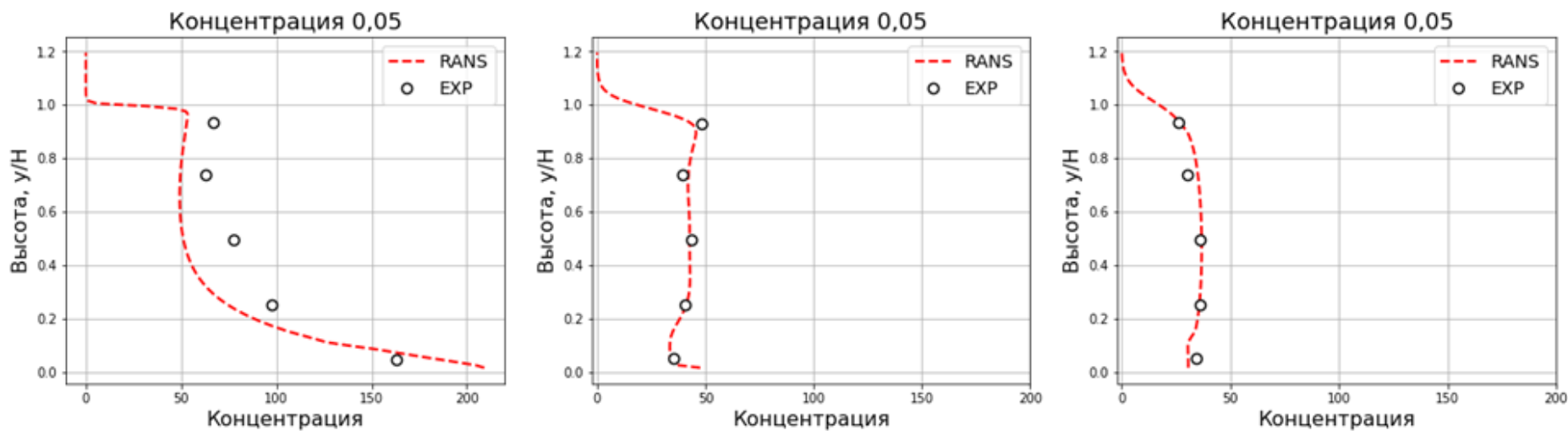
Для анализа и визуализации полученных результатов решения задачи были разработаны скрипты на языке Python. На рисунке представлены векторное поле скорости и распределение концентрации примеси в сечении $y = 0.5 * L$.



Верификация математической модели



Сравнение результатов натурного эксперимента с результатами математического моделирования.



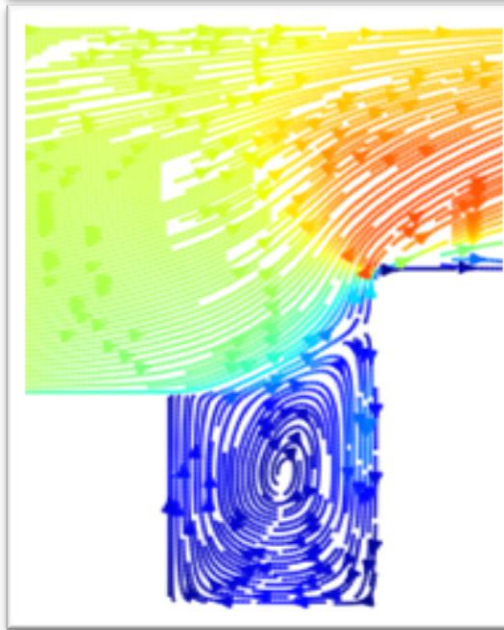
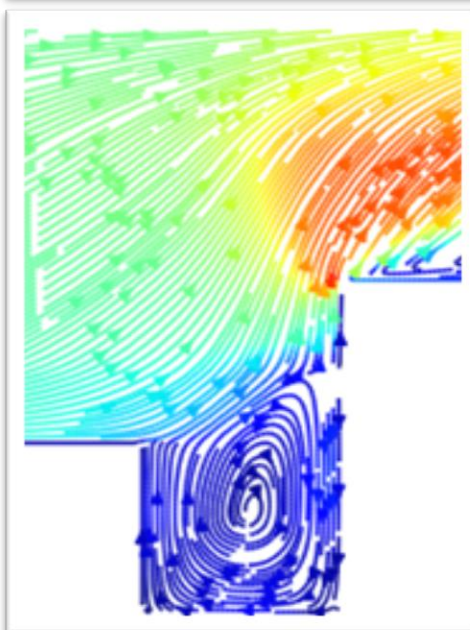
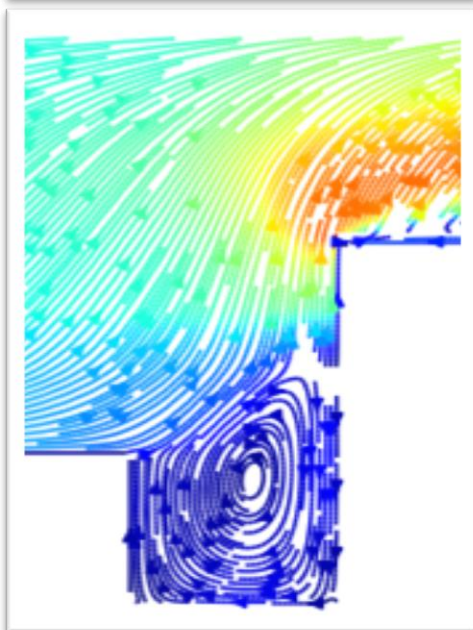
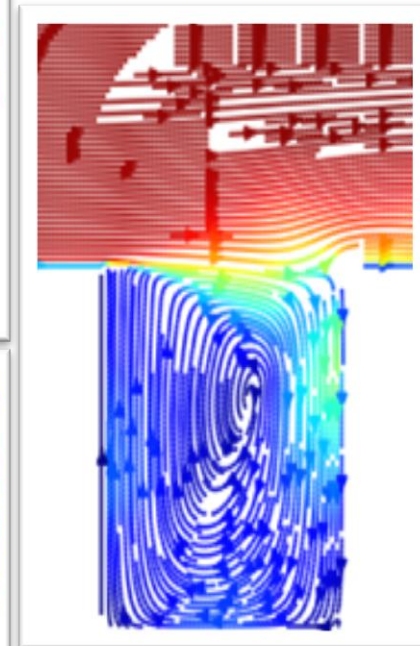
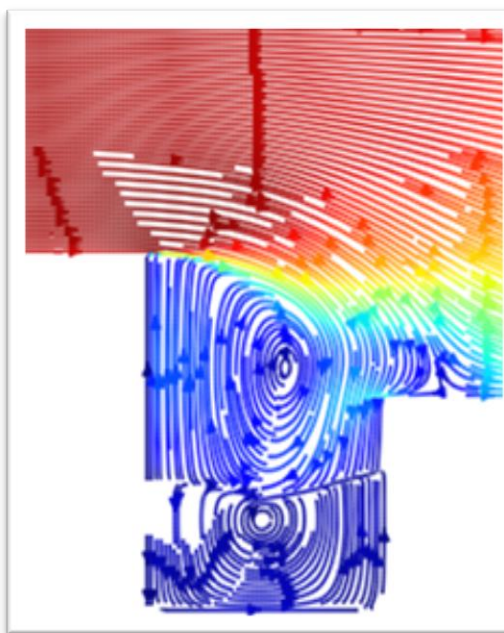
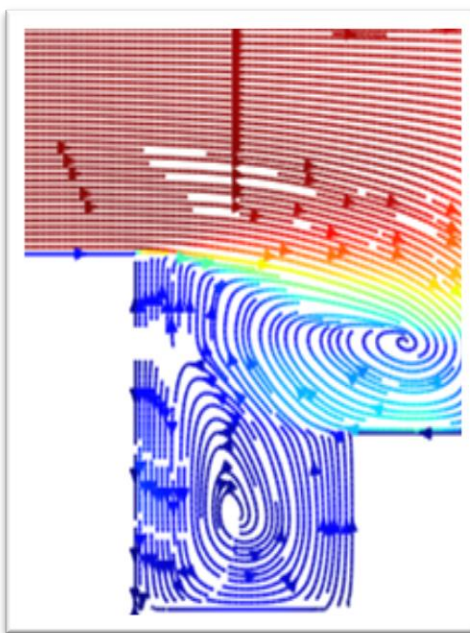
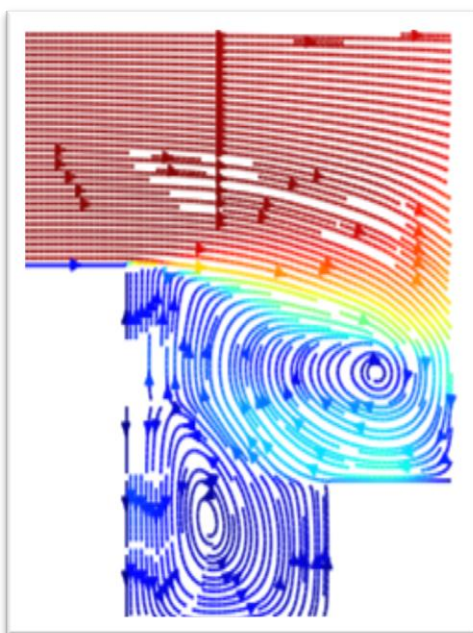
Влияние геометрии уличного каньона на структуру течения

Усилия были сосредоточены на проведении параметрических расчетов с использованием программного комплекса M2U и выявления неблагоприятных сценариев проветривания уличных каньонов.

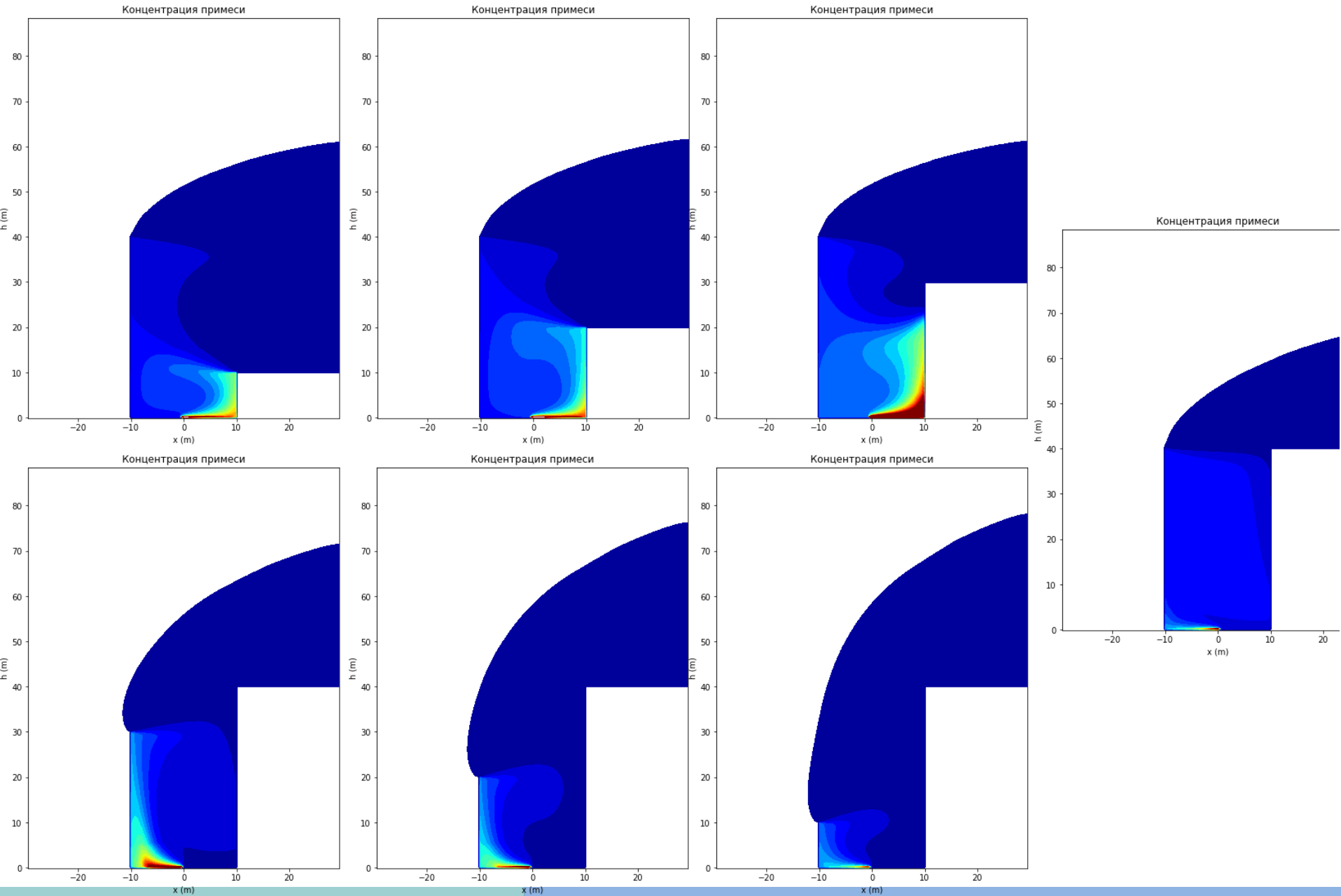
Таблица 1 - Исследование влияния геометрических размеров несимметричного уличного каньона на максимальную и среднюю концентрацию вредных выбросов в зоне дыхания. Размеры зданий и ширина улицы

Номер расчета	Размер первого здания	Размер улицы	Размер второго здания	Обозначение
1	40x20	20	10x20	40x10
2	40x20	20	20x20	40x20
3	40x20	20	30x20	40x30
4	40x20	20	40x20	40x40
5	30x20	20	40x20	30x40
6	20x20	20	40x20	20x40
7	10x20	20	40x20	10x40

Влияние геометрии уличного каньона на структуру течения



Влияние геометрии уличного каньона на структуру течения



Влияние геометрии уличного каньона на структуру течения

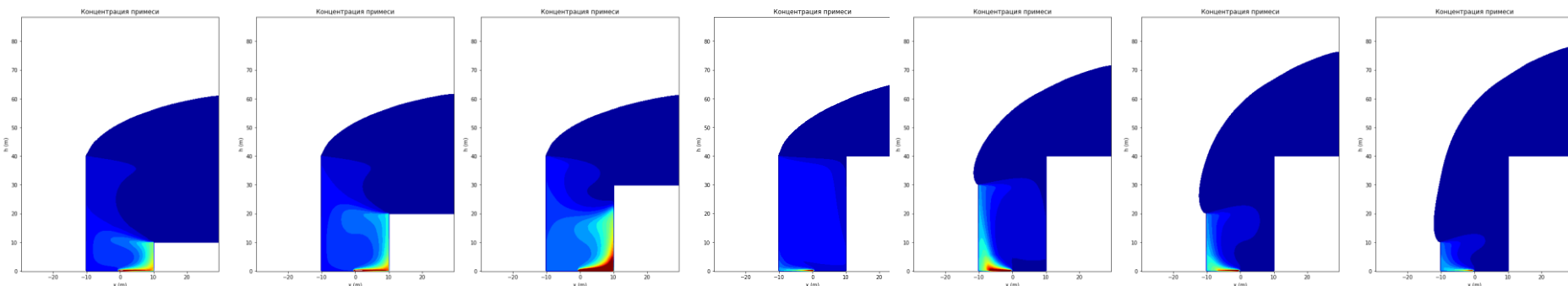
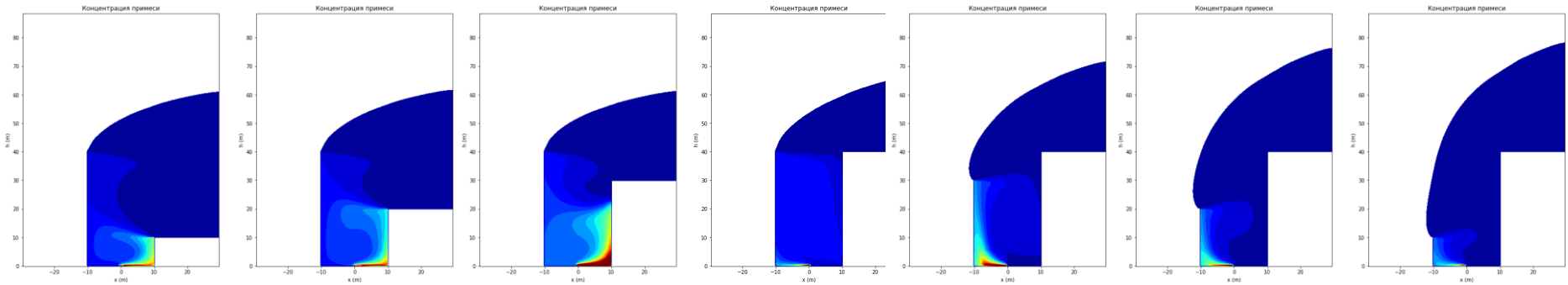


Таблица 2 - Исследование влияния геометрических размеров несимметричного уличного каньона на максимальную и среднюю концентрацию вредных выбросов в зоне дыхания. Результаты моделирования

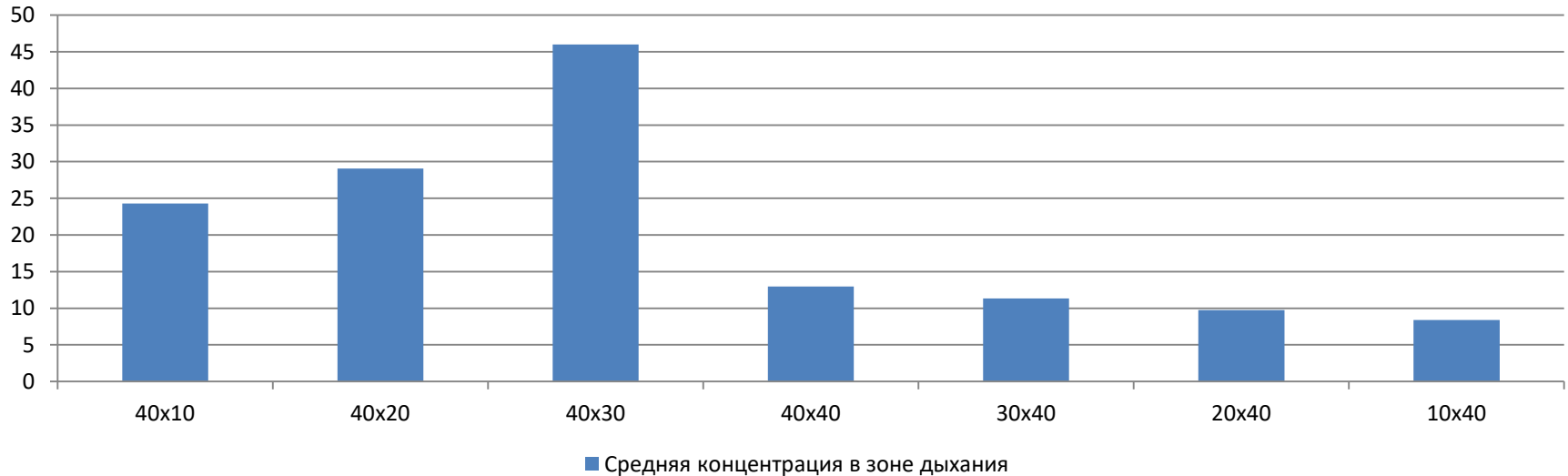
Обозначение	Максимальная концентрация в каньоне	Средняя концентрация в каньоне	Средняя концентрация в зоне дыхания
40x10	204,544	6,92	24,28
40x20	310,066	8,278	29,067
40x30	356,666	9,437	45,994
40x40	451,151	3,825	12,955
30x40	127,07	2,681	11,342
20x40	91,413	2,165	9,743
10x40	61,309	1,864	8,405

Влияние геометрии уличного каньона на структуру течения

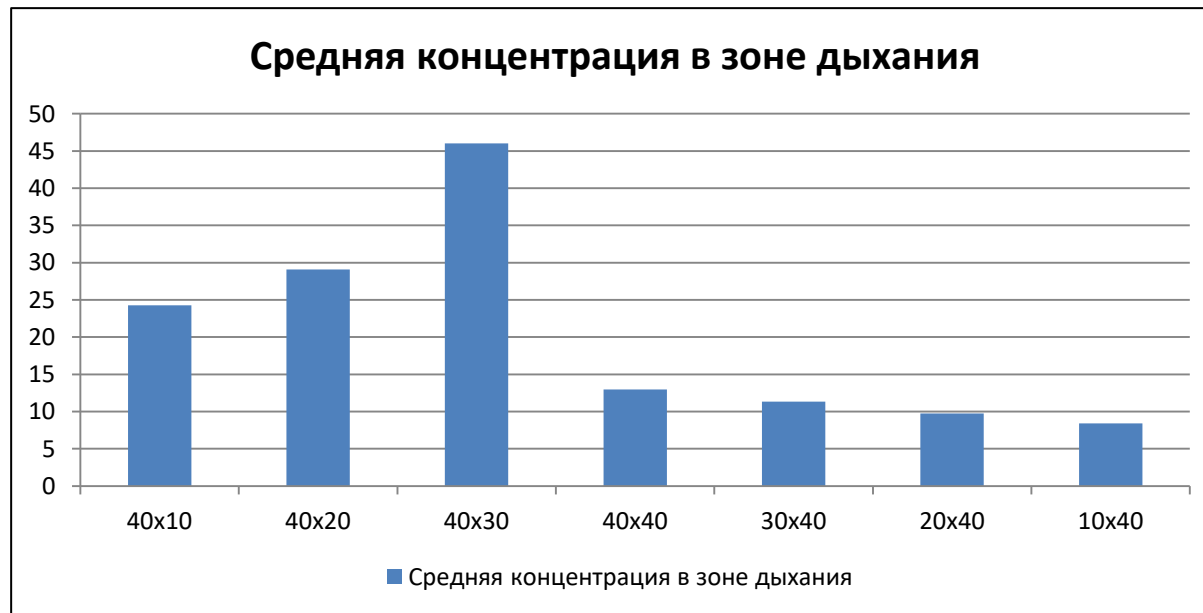
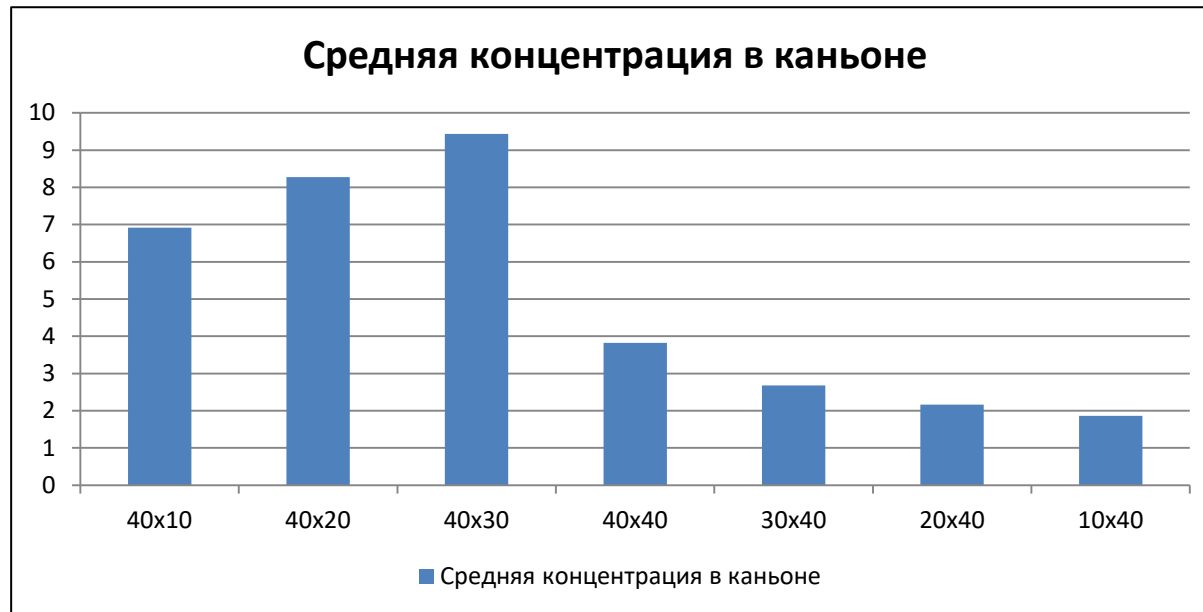


Результаты моделирования показывают, что максимальные значения средней концентрации как в каньоне в целом, так и в зоне дыхания наблюдаются в случае если наветренное здание ниже. Причиной является двух вихревое течение формирующиеся в этом случае.

Средняя концентрация в зоне дыхания



Влияние геометрии уличного каньона на структуру течения



Выводы:

1. Для турбулентного течения воздуха в несимметричном каньоне исследовано, каким образом высота образующих уличного каньона влияет на структуру течения и средние концентрации вредных выбросов автотранспорта.
2. Рассчитаны и проанализированы интегральные характеристики концентрации примеси в уличном каньоне в целом и в зоне дыхания (до 2 м от дна каньона) в частности.
3. Получено, что уменьшение высоты наветренного здания по отношению к подветренному приводит к значительному увеличению значений максимальных и средних концентрации примеси в каньоне.

Спасибо за внимание